

TARTU ÜLIKOOL
EESTI MEREINSTITUUT JA
ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT
ZOOLOOGIA OSAKOND
LOODUSRESSURSSIDE ÕPPETOOL

Lagle Matetski

Erinevatest jõgedest pärit meriforelli (*Salmo trutta*) noorjärkude eristamine
otoliidi elemendilise sõrmejälje abil

Magistritöö

Juhendajad: Mehis Rohtla
Roland Svirgsden

Tartu 2014

Sisukord

1. Sissejuhatus.....	3
2. Kirjanduse ülevaade.....	5
2.1. Meriforell.....	5
2.2. Otoliidid.....	5
2.2.1. Otoliitide koostis ja kasv.....	5
2.2.2. Elementide tee otoliiti.....	7
2.2.3. Otoliitide omadused.....	8
2.2.4. Peamised elemendid ja isotoobid.....	8
2.2.4.1. Strontsium.....	8
2.2.4.2. Baarium.....	10
2.2.4.3. Magneesium, mangaan ja tsink.....	10
2.2.5. Faktorid, mis mõjutavad otoliitide mikrokeemiat.....	11
2.2.5.1. Soolsus.....	11
2.2.5.2. Temperatuur.....	12
2.2.5.3. Toit.....	13
2.2.5.4. Koosmõjud.....	14
2.2.6. Otoliitide kasutamine ihtüoloogilistes uuringutes.....	15
2.2.6.1. Sõrmejälje meetod.....	15
2.2.6.2. Vanuse määramine.....	17
2.2.6.3. Rännete uurimine.....	17
2.2.6.4. Otoliidi tuuma kasutamine.....	18
2.2.6.5. Märgistamine.....	19
2.3. Jõed.....	20
2.3.1. Jõgede iseloomulikud omadused.....	20
2.3.2. Jõgede veekeemia ja selle kujunemine.....	20
2.3.3. Peamised ioonid.....	22
2.3.4. Eesti jõed.....	23
3. Materjal ja metoodika.....	24
3.1. Kalade ja veeproovide kogumine.....	24
3.2. Otoliitide eemaldamine laboris ja ettevalmistamine analüüsiks.....	25
3.3. Otoliite mikrokeemilised analüüsid.....	26
3.4. Andmeanalüüs.....	27
4. Tulemused.....	29
4.1. Veeproovide tulemused.....	29
4.2. Otoliitide mikrokeemia tulemused.....	31
5. Arutelu.....	36
6. Kokkuvõte.....	43
7. Summary: "Distinguishing juvenile sea trout (<i>Salmo trutta</i>) from different natal streams based on otolith elemental fingerprints.".....	45
Tänuavaldused.....	47
Kasutatud kirjandus.....	48
LISAD.....	56

1. Sissejuhatus

Meriforell (*Salmo trutta*) on üks hinnatumaid püügikalu nii rannikumeres kui ka jõgedes ning seda nii Eestis kui ka mujal maailmas. Meriforellid eelistavad oma kudemispaigana kiirevoolulisi, kärestikega, puhta ning hapnikurikka veega jõgesid ja ojasid (Rannak *et al.*, 1983). Seetõttu ei ole kõik jõed meriforellile kudemiseks sobilikud. Lisaks sellele on sobilikud kudejõed väga tundlikud inimõju (rändetõkked, elupaiga kaotus jne) suhtes. Rannikumeres püsib aga pidev püügisurve ning olemasolevad jõed ei pruugi suuta piisavalt täiendit "toota". Selle tõttu on oluline meriforelli kaitsta ja turgutada. Üheks võimaluseks meriforellide kaitsmiseks oleks välja selgitada, millised jõed on peamised meriforellide "tootjad" ning need siis täiendavalt kaitse alla võtta. Parimate kudejõgede leidmiseks saaks kasutada otoliitide keemilise sõrmejälje meetodit.

Otoliidid on kalade peas asuvad luulised struktuurid ning otoliitide mikrokeemia sõltub kala ümbritseva keskkonna keemiast (Campana 1999). Selle tõttu on otoliidid kasulikud erinevate ihtüoloogiliste uuringute läbiviimisel, näiteks sõrmejälje meetodit kasutades. Keemilise sõrmejälje moodustavad mitme erineva keemilise markeri kontsentratsioonid. See on justkui looduslik märgis, sest see kujuneb tänu vee-elupaikade varieeruvale veekeemiale (Martin *et al.*, 2013). Otoliitide sõrmejälje abil saab eristada kalu ning kalade gruppe, kes on vähemalt osa elust elanud erinevates keskkondades (Campana 1999). Seega saab otoliitide sõrmejälge kasutada ka erinevatest jõgedest pärit kalade eristamiseks. Mujal maailmas on otoliitide sõrmejälje meetodi abil väga edukalt suudetud eristada kalu erinevatest jõgedest ning leitud selle abil ka parimaid kudejõgesid. Selliseid uuringuid on teostatud mitmete anadroomsete liikidega (Engstedt *et al.*, 2013; Gahagan *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2013). Forellide kohta leidub vaid üksikuid uuringuid (Olley *et al.*, 2011; Veinott *et al.*, 2012).

Eestis on otoliitide mikrokeemia kasutamine ihtüoloogilisteks uuringuteks veel küllaltki uudne ning sõrmejälje meetodit ei ole siin varem kasutatud. Praeguseks on Eesti otoliidi mikrokeemiliste uuringute teostamisel olnud üheks piiravaks teguriks ebapiisavad teadmised enamike pinnaveekogude keemiliste elementide sisalduse kohta. Samuti peab sõrmejälje meetodi kasutamise puhul eelnevalt alati uurima, kas ja kui suured erinevused on uuritavate kohtade vahel. Sellest tulenevalt on antud töö peamiseks

uurimisprobleemiks: Kas Eestis oleks võimalik kasutada sõrmejälje meetodit erinevatest jõgedest pärit kalade eristamiseks?

Täpsemalt on käesoleva töö eesmärgiks:

1. iseloomustada Eesti jõgede veekeemia ruumilist ja ajalist varieeruvust;
2. leida, millised veeproovides sisalduvad elemendid võivad olla kõige paremad nii jõgede omavaheliseks kui ka hiljem kalade eristamiseks;
3. leida, millised jõed paistavad silma oma veekeemia poolest ja kas kalu on statistiliste meetodite abil võimalik tagasi määrata oma päritolu jõkke;
4. uurida, kas kalade sõrmejäljed varieeruvad ka riikide vaheliselt ning kas sõrmejälje meetodit oleks võimalik kasutada ka rahvusvaheliselt?

Käesolev töö on unikaalne ka mastaabi poolest. Varasemates töodes on sõrmejälje meetodit peamiselt kasutatud vaid üksikute jõgede ning proovivõtu punktide eristamiseks (Martin *et al.*, 2013; Engstedt *et al.*, 2013). Ehk siiani pole veel ükski selleteemaline teadustöö kasutanud nii tihedat proovivõtu punktide võrgustikku, mis on pealegi jaotatud suhteliselt suurele ruumiskaalale. Käesoleva töö tulemused on baasandmeteks edaspidistele uuringutele, mille eesmärkideks on välja selgitada merest püütud täiskasvanud kalade päritolu ning seeläbi vajadusel välja töötada kaitse- ja turgutusmeetmed kehvast seisusest olevate kudejõgede olukorra parandamiseks.

2. Kirjanduse ülevaade

2.1. Meriforell

Meriforell (*Salmo trutta*) kuulub lõheliste (*Salmonidae*) sugukonda (Rannak *et al.*, 1983). Meriforelli elutsüklil on küllaltki keerukas. Nende koelmud asuvad magedas vees, kuid täiskasvanuna elavad ja toituvad nad meres. Suguküpsete isendite kuderänne toimub sügisel ning kudumine toimub peamiselt oktoobris ja novembris (Mikelsaar 1984). Kudumiseks eelistab meriforell puhtaveelisi kiirevoolulisi väiksemaid jõgesid ning ojasid. Koelmud paiknevad jõgede karestikel, kus põhja substraadiks on kivid ja kruus. Eesti asuvad olulisemad meriforelli kudejõed põhjarannikul. Sealsete jõgede alamjooksudel leidub rohkesti meriforellile sobilikke karestikke. Arvestataval hulgal leidub meriforellile sobilikke jõgesid ja ojasid veel Saaremaal, Hiiumaal ning Pärnumaal. Kõige vähem leidub sobilikke koelmuid Läänemaa jõgedes. Koelmutel kaevavad emased kalad sabaga voolusuunas piklikud pesad. Marjaterad koetakse pesa kruusasele põhjale, mis pakub arenevatele embrüotele kaitset. (Rannak *et al.*, 1983). Marjaterade inkubeerimine ning areng võtab aega ligi seitse kuud ning kevadel (aprillis, mais) kooruvad pisikesed maimud (Mikelsaar 1984). Elu esimesel perioodil, mis kestab 20-30 päeva, toituvad kalad rebukotis leiduvatest toitainetest. Selle aja veedavad kalad kaitstuna kruusaterade vahel. Rebukoti imendumise järel tõusevad kalad kruusa vahelt üles ning lähevad üle välisele toitumisele (Milner *et al.*, 2003). Jõgedes veedavad noored kalad keskmiselt 1-3 aastat mille järel nad laskuvad merre. Seal nad toituvad ja kasvavad ligikaudu 2 aastat, mille järel nad naasevad oma sünnijõgedesse kudema (Mikelsaar 1984).

2.2. Otoliidid

Kalade sisekõrvas asub kolm poolringikujulist kanalit ning kolm otoliidi organit – ümarkotike, ovaalkotike ja lageen (Ladich & Popper 2004). Iga selline otoliidi organ sisaldab endas pisikesi kaltsiumkarbonaadist kristallikesi, mis kaladel on tihenend ühtseks massiks ning moodustavad otoliidi (Popper *et al.*, 2005). Otoliiite ehk kuulmekivikesi on kaladel kolm paari. Ümarkotikeses paikneb *sagitta*, ovaalkotikeses *lapillus* ja lageenis *astericus* otoliidid. Kaladele on otoliidid vajalikud kuulmiseks ning gravitatsiooni tajumiseks (Campana 1999).

2.2.1. Otoliiitide koostis ja kasv

Võrreldes teiste bioloogiliste ning mineraloogiliste struktuuridega, on otoliitide koostis üpris puhas, koosnedes peamiselt kaltsiumist (Ca), süsinikust (C) ning hapnikust (O). Koos moodustavad need elemendid kaltsiumkarbonaadi (CaCO_3). Kaltsiumkarbonaat võib esineda kolmes erinevas vormis – kaltsiidina, aragoniidina ning vateriidina (Campana 1999). Otoliidid koosnevad peamiselt aragoniidist, kuid leidub ka täiesti või osaliselt vateriitseid otoliite (Campana 1983). Vateriitne otoliit on üldiselt palju läbipaistvam ning silmaga ei ole näha ka otoliidile iseloomulikke kasvurõngaid (vt allpool). Päris selge ei ole veel see, miks otoliidid koosnevad enamikel juhtudel ainult aragoniidist. See võib olla seotud asjaoluga, et kolmest võimalikust vormist on just aragoniidil kõige suurem erikaal. Otoliidid on aga kalale olulised gravitatsiooni tajumiseks (Campana & Thorrold 2001).

Lisaks kolmele peamisele koostisosale leidub otoliitides ka hulgaliselt erinevaid jälg- (>100ppm) ning mikroelemente (<100ppm), mida on kokku leitud üle 31 (Campana 1999). Need elemendid on võimelised asendama Ca^{2+} aragoniidi maatriksis ning lisanduvad sel viisil otoliidi koostisesse (Bath *et al.*, 2000). Jälgelementide hulka kuuluvad näiteks naatrium (Na), strontsium (Sr), kaalium (K), väävel (S), lämmastik (N), kloor (Cl) ja fosfor (P). Suuremat osa mikroelementide (näiteks Mg, Mn, Ba, Fe) kontsentratsioon otoliitides on <10ppm. Üldjuhul moodustab CaCO_3 otoliidi koostisest kuni 96%, orgaaniline maatriks ligikaudu 3% ning erinevad anorgaanilised lisandid 1% (Campana 1999). Kaltsiumi leidub otoliidis stöhhiomeetriliselt (s.o. ca 400 000 ppm), mistõttu Ca kasutatakse analüütilises keemias n-ö sisestandardina.

Otoliidide kasv saab alguse pisikestest kristallisatsioon punktidest, mida nimetatakse ka primordiumiteks (inglk.: *primordia*). Selliseid punkte võib olenevalt liigist olla üks või mitu ning kokku moodustavad nad otoliidi südamiku (Melancon *et al.*, 2008). Otoliiit hakkab kasvama pärast marjatera viljastamist, kuid enne kala koorumist (Riley *et al.*, 1997). Kogu materjal ladestub otoliitidele kasvurõngastena. Kasvurõngaid võib vaadata aastate, aga ka päevade lõikes. Päevaseid kasvurõngaid on üldiselt võimalik lugeda nooremate kalade puhul (Pannella 1971). Päevaseid kasvurõngaid iseloomustab 24 h perioodilisus, mis tähendab seda, et üks kasvurõngas moodustub 24 h jooksul. Mida vanemaks kala saab, seda kitsamaks muutuvad päevased ringid ning selle tõttu on vanemate kalade otoliitidel näha vaid aastased kasvurõngad. Aastase kasvurõnga moodustavad samuti kaks tsooni – aeglaselt kasvav tsoon, mis koosneb peamiselt

orgaanilisest materjalist, ning kiiresti kasvav tsoon, mis koosneb peamiselt anorgaanilisest materjalist. Kiiresti kasvav tsoon on pealtvalgustusega vaadates tihti heledam ning paksem kui aeglaselt kasvav, tume ning kitsas kasvurõngas (Pannella 1971).

2.2.2. Elementide tee otoliiti

Otoliidi biomineralisatsioon ehk kasv erineb selgroogsete luude, limuste karpide ning korallide moodustumisest. Peamiseks erinevuseks on see, et otoliidi epiteel ei ole otseselt kokkupuutes kaltsifikatsiooni alaga. Selle tõttu on kaltsifikatsiooni protsess suuresti sõltuv endolümf koostisest, mis otoliiti ümbritseb (Campana 1999). Endolümf sisaldab endas peamiselt Ca , CO_2^{-3} ning HCO^3 , lahustunud anorgaanilist süsinikku ning erinevaid jälgelemente.

Elementide jõudmine otoliiti on mitmeastmeline protsess, mida iseloomustab erinevate barjääride esinemine. Elementide tee otoliiti saab alguse veest, kust erinevad elemendid sisenevad verre kas läbi lõpuste või seedeelundkonna (Campana 1999). Mageveekalade puhul on kõige olulisemad just lõpuste kaudu sisenevad elemendid, sest mageveekalad vett ei joo ja enamik ioone siseneb verre aktiivselt lõpustel asuvate kloriidirakkude abil. Üldiselt on nii, et mida karedam ning soolasem on vesi, seda olulisemaks saavad seedeelundkonna kaudu sisenevad metallid. Seda selle tõttu, et merekalad peavad piisava keha veesisalduse hoidmiseks pidevalt jooma (Olsson *et al.*, 1998).

Edasi kulgeb elementide tee läbi vere endolümf koostisesse ning sealt edasi otoliiti. Enamiku elementide puhul on element:Ca suhe otoliidis madalam kui veres või kala ümbritsevas keskkonnas (Campana 1999). Elementide koguse regulatsioon võib toimuda igas etapis ja erinevas ulatuses. Näiteks on leitud, et K^+ kontsentratsioon endolümfis võib olla kuni 41 korda kõrgem kui veres. Samas leidub endolümfis verest rohkem Na^+ ning ka Ca^+ kontsentratsioon võib moodustada vaid kuni 45% veres olevast kontsentratsioonist (Payan 1997). Kahtlemata on üheks suurimaks barjääriks elementide teel vesi-lõpused või vesi-seedeelundkonna faas. Peamiselt selle tõttu, et just nendes faasides kontrollib füsioloogiline ionregulatsioon küllaltki rangelt seda, millised elemendid kala verre jõuavad (Olsson *et al.*, 1998).

Otoliidi mikrokeemia võib üsna hästi peegeldada kala ümbritseva keskkonna keemiat (Melancon *et al.*, 2008). Oluline on aga tähele panna, et erinevad elemendid suudavad läbi barjääride liikuda erinevates kogustes ning ka kala ümbritsev keskkond (soolsus, temp) mõjutab seda, kui palju erinevaid elemente lõppkokkuvõttes otoliiti jõuab.

2.2.3. Otoliitide omadused

Otoliitidel on mitu olulist omadust, mille tõttu kasutatakse neid erinevate ihtüoloogiliste uuringute läbiviimisel.

1. Kasv on pidev. Otoliidi moodustumine saab alguse juba enne kala koorumist ning kestab terve kala elu, kuni surmani (Campana & Neilson 1985). Materjali lisandumine otoliidile ei lakka ka nälja tingimustes (Campana 1983). Selle põhjuseks on asjaolu, et erinevalt teistest lubjastunud struktuuridest kehas, ei kuulu otoliidid skeleti koostisesse. Skeleti osade kasvamine on väga tihedalt seotud ka organismi kasvuga, mistõttu võib skeleti osade kasv lakata näiteks nälja tingimustes (Campana & Thorrold 2001). Tänu pidevale kasvule ladestub otoliidile materjali ja ka informatsiooni juurde ümbritsevast keskkonnast kogu kala elu jooksul.

2. Otoliidile toimub materjali lisandumine kasvurõngastena (Melancon *et al.*, 2008). Kasvurõngastena kasvamine tagab selle, et kogu keemiline materjal on otoliiti ladestatud kronoloogilises järjekorras.

3. Erinevalt teistest kala kehas leiduvatest lubjastunud struktuuridest (nt soomused ja luud) ei toimu otoliitides resorptsiooni (Melancon *et al.*, 2008). See tähendab, et kõik, mis sinna ladestatakse, jääb sinna ka püsima. See omadus on ainulaadne otoliitidele ning ei ole omane mitte ühelegi kala või ka teiste selgroogsete kehas asuvale luulisele struktuurile (Campana & Thorrold 2001).

2.2.4. Peamised elemendid ja isotoobid

2.2.4.1. Strontsium

Strontsium on kõige laialdasemalt kasutuses olev element erinevates otoliidi keemilisel koostisel põhinevates ihtüoloogilistes uuringutes. Selle põhjuseks on asjaolu, et Sr jõuab veest otoliitidesse proportsionaalselt samas koguses (Martin *et al.*, 2013) ehk Sr:Ca suhted vees ning otoliidis on üldjuhul omavahel väga tugevasti korreleerunud. Sr puhul ei toimu väljasadenemist jms ilmselt seetõttu, et Sr ioon on nii valentsilt kui ka

raadiuselt Ca ioonile väga sarnane ning ladestatakse kindlalt aragoniidi maatriksisse (Martin *et al.*, 2004). Kuna Sr sisaldus vees on tihedalt seotud soolsusega (Campana 1999), kasutatakse Sr laialdaselt just kalade rännete uurimisel, eriti diadroomsete rännete puhul (vt täpsemalt 2.2.6.3). Diadroomsete rännete uurimise üheks eelduseks on aga see, et magedas vees on Sr sisaldus madalam kui meres. Antropogeensed mõjud võivad seda eeldust rikkuda. Kaevandusveed, mis on kõrge mineraalainete sisaldusega, võivad tõsta Sr sisaldust vees looduslikust tasemest oluliselt kõrgemale. Selline nähtus on ilmnenud varasemates uuringutes, näiteks mõningates Kirde-Eesti jõgedes (Szava-Kovats 2001). Sr kasutatakse laialdaselt ka sõrmejälje meetodi puhul (vt täpsemalt 2.2.6.2.), kuna vees on Sr sisaldus tugevalt mõjutatud ka aluspõhjust. Sr on üldiselt litogeenset päritolu (Jarvie *et al.*, 2000). Peamiselt kontrollivad kaltsiidi- ja kaaliumirikkad kivimid Sr sisaldust vees (Szava-Kovats 2001), ning karbonaatsetes kivimites on Sr sisaldus tunduvalt kõrgem kui mittekarbonaatsetes kivimites (Kennedy *et al.*, 2000).

Viimastel aastatel on üha rohkem kasutust leidnud ka strontsiumi isotoopide suhe ($^{86}\text{Sr}:^{87}\text{Sr}$). Erinevalt Sr endast on $^{86}\text{Sr}:^{87}\text{Sr}$ väärtused vees ja otoliidis pea võrdsed (Martin *et al.*, 2013). Samuti jääb $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhe samaks ka erinevaid troofilisi tasemeid läbides (Kennedy *et al.*, 2000). $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ sisaldus vees on aga väga tugevasti mõjutatud veekogu aluspõhja koostisest ja vanusest. ^{87}Sr tekib ^{87}Rb isotoobi lagunemisel (poolestusaeg $4,9 \times 10^9$ aastat). Rb/Sr sisaldus aluspõhjas ja mineraalides sõltub väga palju konkreetse aluspõhja või mineraali vanusest. Selle tulemusena varieerub $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhe nii ajas kui ka ruumis. Üldiselt on happelistes kivimites kõrgem Rb kontsentratsioon, mille tulemusena tekib kõrge $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhe. Aluselistes kivimites on Rb kontsentratsioon madalam ning tulemuseks on madal $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhe (Löfvendahl *et al.*, 1990). Viimane on ka peamine põhjus, miks Sr isotoobid on eriti kasulikud uuringutes, mille põhilisteks eesmärkideks on erinevatest veekogudest pärit kalade eristamine.

Kuid Sr isotoope kasutatakse ka muudel eesmärkidel, sest lisaks aluspõhja iseloomule on ka $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ sisaldus vees tugevasti mõjutatud soolsuse poolt (Campana 1999). Maailmameres on $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhe 0.7091 (Kennedy 2002). Tänu sellele ”baasväärtusele” on väga lihtsalt võimalik küllaltki täpselt kindlaks teha, kui kaua mingi konkreetne kala on veetnud meres ning millal ta sinna laskus. Kindlasti on $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ aga olulisemad just

magevee rännete uurimise puhul. Kuna magedas vees puudub Sr:Ca suhte suur varieeruvus, on kasutatud ^{87}Sr : ^{86}Sr selleks, et uurida mageveesiseseid rändeid (vt täpsemalt 2.2.6.3).

2.2.4.2. Baarium

Peale Sr on Ba teine põhiline element, mille isotoope on kasutatud erinevateks uuringuteks. Nagu eelnevalt mainitud, jõuavad otoliiti kõige paremini sellised elemendid, mis on kõige sarnasemad Ca ioonile. Lisaks Sr on ka Ba iooni raadius küllaltki lähedale Ca ioonile ning selle tõttu on ka Ba väga edukalt võimeline Ca asendama otoliidi kristallmaatriksis (Campana 1999). Tänu sellele lisandub Ba otoliiti peaaegu samas koguses nagu teda leidub vees (Bath *et al.*, 2000).

Bath jt. (2000) kasutasid *Leiostomus xanthurus*'e vastseid kasvatades nelja erinevat Ba kontsentratsiooni vees. Tulemustest selgus, et Ba:Ca suhe vees oli otseselt seotud ka Ba:Ca suhtega otoliidis ehk mida rohkem sisaldus vees Ba, seda rohkem Ba jõudis ka otoliiti. Lisaks Bath jt. (2000) uuringule, on ka mitmed teised tööd leidnud, et Ba sisaldus vees ning otoliidis on väga tugevalt korreleerunud (Elsdon & Gillanders 2003; Collingsworth *et al.*, 2010; Woodcock *et al.*, 2011). Selline tulemus ei paista olenevat ka liigist, sest väga erinevate liikide puhul on leitud samu tulemusi - *Leiostomus xanthurus* (Bath *et al.*, 2000), *Acanthopagrus butcheri* (Elsdon & Gillanders 2003), *Perca flavescens* (Collingsworth *et al.*, 2010), *Macquaria ambigua* (Woodcock *et al.*, 2011). Seega on Ba võimalik kasutada erinevate tööde teostamiseks erinevate liikidega, mille puhul on oluline, et otoliit peegeldaks vee keemiat. Lisaks sellele mõjub Ba sisaldusele otoliidis ka soolsus (vt täpsemalt 2.2.5.1), mistõttu kasutatakse tihti Ba koos Sr paljudes rännetega seotud iktüoloogilistes uuringutes.

2.2.4.3. Magneesium, mangaan ja tsink

Lisaks Sr ning Ba on erinevateks uuringuteks kasutatud ka Mg, Mn ning Zn. Nende elementide puhul aga ei ole pilt nii selge, kui eelpool nimetatud keemiliste markeritega. Näiteks on Mg ja Mn puhul avaldatud nii positiivseid (Mohan *et al.*, 2012; Barnes & Gillanders 2013) kui ka negatiivseid (Martin & Thorrold 2005; Collingsworth *et al.*, 2010; Woodcock *et al.*, 2011; Veinott *et al.*, 2014) näiteid selle kasutamisest. Põhiliseks probleemiks paistab olevat see, et vees olevate Mg ning Mn sisaldus ei ole otseselt

seotud otoliidis olevaga. Üheks põhjuseks võib olla see, et nii Mg kui ka Mn võivad olla väga tugeva füsioloogilise kontrolli all (Martin & Thorrold 2005). Probleeme võib tekitada ka nende elementide ebastabiilsus otoliidis (Veinott *et al.*, 2014). Veinott jt. (2014) keskendus end uuringus Zn, Mg, Mn, Ba ja Sr stabiilsusele meriforelli otoliidis. Uuringust selgus, et Zn, Ba ning Sr olid läbi aja stabiilsed, kuid Mg ja Mn kontsentratsioonid otoliidi tuumas ajas muutusid. Üheks võimalikuks seletuseks võib olla see, et Mg ning Mn ei ole otoliidi kristallstruktuuri nii kõvasti kinnitunud kui nt Sr, mille tulemusena võivad nad aja jooksul sealt tagasi endolümfis koostisesse liikuda. Kuigi Veinotti jt. (2014) uuringust selgus, et Zn on võrreldes Mg ning Mn palju stabiilsem element otoliidis, pole ka selle elemendi kasutamine probleemivaba. On leitud, et sarnaselt Mn ning Mg, ei peegeldu vees olev Zn otseselt otoliidis (Gibson-Reinemer *et al.*, 2009). Selle põhjuseks võib olla see, et Zn omastamine organismi poolt on küllaltki rangelt kontrollitud. Lisaks sellele toimub kalade puhul Zn peamine omastamine seedeelundkonna kaudu (Bury *et al.*, 2003), mistõttu paistab Zn puhul olevat ka küllaltki tugev toidu mõju (Ranaldi & Gagnon 2008). Eelpool toodust tulenevalt tuleb Mg, Mn ja Zn kasutada suure ettevaatlikkusega.

2.2.5. Faktorid, mis mõjutavad otoliitide mikrokeemiat

Otoliidi mikrokeemiat mõjutavad paljud faktorid. Peamiseks mõjutaks on (vee) keskkonna keemiline koostis, mis on ka kõikide otoliitidega teostatavate ihtüoloogiliste uuringute aluseks. Kuid ka teised keskkonna faktorid võivad omada mõningast kuni olulist mõju.

2.2.5.1. Soolsus

Kalade rännete uurimisel, eriti töödes diadroomsete liikidega, kes rändavad elu jooksul pidevalt soolase ning mageda vee vahel, on oluline teada, mismoodi mõjutab soolsus otoliidi mikrokeemiat. Soolsuse mõju otoliidi koostisele on uuritud just peamiselt Sr puhul, sest Sr kontsentratsioon merevees (35‰) võib olla ligi 100 korda suurem kui magedas vees (Campana 1999). Sealjuures kasvab Sr kontsentratsioon vees koos kasvava soolsusega lineaarselt (Arai 2010). Selle tõttu võib arvata, et soolsuse mõju otoliitide Sr:Ca suhtele avaldubki peamiselt läbi veekeemia. Väga paljudes uuringutes ongi leitud positiivne korrelatsioon soolsuse ja otoliidi Sr:Ca suhte vahel (Kalish 1990; Secor *et al.*, 1995; Zimmerman 2005). Sr:Ca suhe vees kasvab aga kasvava soolsusega lineaarselt vaid teatud soolsuseni (kuni 8-10 ‰) ning üldjuhul varieerub Sr:Ca suhe

kõrgematel soolsustel küllakti vähe (Arai 2010; Macdonald & Crook 2010). See võib olla ka üheks põhjuseks, miks mõningal juhul on soolsuse positiivne mõju ilmnenud Sr:Ca suhtele otoliidis vaid siis, kui on võrreldud küllaltki erinevaid soolsusi (magevesi vs riimvesi vs merevesi) (Zimmerman 2005).

Soolsus mõjutab oluliselt ka Ba:Ca suhet, enamasti on soolases vees Ba:Ca suhe madalam kui magedas vees (Macdonald & Crook 2010). Sarnaselt Sr, mõjutab soolsus Ba kontsentratsiooni vees kõige rohkem madalatel soolsustel. Kõrgematel soolsustel varieerub Ba:Ca suhe vähe (Macdonald & Crook 2010). Ba jõuab veest otoliiti proportsionaalselt samas koguses (Bath *et al.*, 2000). Sellest tulenevalt peaks otoliitidele kujunema madalama soolsuse juures kõrgem Ba:Ca suhe. Seda on erinevate katsete tulemusena ka mitmel korral kinnitatud (Thorrold 1997; Martin & Thorrold 2005; Gahagan *et al.*, 2012).

Mõningal juhul on täheldatud, et Ba säilib kõrgena ka siis, kui Sr väärtus viitab juba täis soolsusega vees viibimisele (Gahagan *et al.*, 2012). Selle taga võib olla asjaolu, et Ba sisaldus vees ei sõltu soolsusest nii selgelt kui Sr. Uuringutes estuaaridega on leitud, et Ba sisaldus vees võib olla kõige kõrgem just madalate soolsuste juures, mitte aga magedas vees. Harvadel juhtudel aga ka kuni 20% juures. Selle taga on küllaltki keerukad mehhanismid, mis seotud Ba eraldumisega setetest (Coffey *et al.*, 1997). See ilmestab asjaolu, et kuigi uuringutes on ilmnenud, et Ba kontsentratsiooni sõltuvus soolsusest on negatiivne, ei pruugi Ba käitumine olla nii selge kui Sr puhul.

2.2.5.2. Temperatuur

Temperatuur on peale soolsuse teine oluline sekundaarne faktor, mis võib mõjutada otoliitide keemilist koostist. Temperatuuri mõju on uuritud suhteliselt palju ja seda eelkõige põhjusel, et usuti kala temperatuuri ajaloo rekonstrueerimise võimalusse (korallide lubikehade eeskujul). Nüüdseks on sellest suuresti loobutud, sest on selgunud, et soolsuse ajaloo rekonstrueerimine on reaalsem. Siiski võib temperatuur omada olulist mõju keemiliselt homogeensetest keskkondades (nt ookean), kus soolsuse ja veekeemia varieeruvus on minimaalne. Erinevate laborikatsete läbiviimisel on otoliidi nii Sr:Ca kui ka Ba:Ca suhte ja temperatuuri vahel täheldatud nii positiivset (Bath *et al.*, 2000; Elsdon & Gillanders 2002; Miller 2009; Collingsworth *et al.*, 2010) kui ka negatiivset suhet

(Townsend *et al.*, 1989; DiMaria *et al.*, 2010), kuid on leitud ka mõju puudumist (Gallahar & Kingsford 1996; Kawakami *et al.*, 1998). Ba ja Sr võivad temperatuuri suhtes käituda ka erinevalt. On leitud, et Ba ei ole temperatuuri poolt nii tugevalt mõjutatud kui Sr (Collingsworth *et al.*, 2010) ning Ba puhul on ilmnenu ka mõju täielikku puudumist, samal ajal kui Sr avaldab temperatuur tugevat mõju (Bath *et al.*, 2000).

On leitud, et temperatuuri mõju taga on tegelikkuses hoopis füsioloogilised mõjud, sest enamasti on temperatuuri negatiivset efekti täheldatud just külmalembeliste kalade puhul (DiMaria *et al.*, 2010) ning positiivset efekti soojalembeliste kalade puhul (Elsdon & Gillanders 2004). See tähendab seda, et temperatuur mõjutab kalade osmoregulaatorset aktiivsust mille tulemusena võib rohkem elemente otoliiti jõuda. Temperatuuri mõju võib sõltuda ka liigi elutsüklist ning harjumustest. Näiteks on leitud temperatuuri mõju puudumist angerjal (Kawakami *et al.*, 1998). Angerjas on võimeline hakkama saama väga laia temperatuuri vahemikuga paikades, mistõttu ei pruugigi temperatuuri varieerumine sellele liigile olulist mõju avaldada. Kindlasti tuleks temperatuuri võimalikku mõju arvestada parasvöötmes elavate kalade puhul, kes kogevad aastaaegade vaheldumise tulemusena elu jooksul küllaltki varieeruvaid temperatuure.

2.2.5.3. Toit

Kuigi üldiselt ollakse ühtsel meelel, et vesi on peamine elementide allikas otoliidis, ei tohi alahinnata ka toidu mõju. Kuna Sr on otoliidi mikrokeemias üks olulisemaid elemente, on peamiselt uuritud toidu mõju just Sr:Ca suhtele otoliidis. Ka siin on leitud nii positiivseid (Limburg 1995) kui ka negatiivseid tulemusi (Hoff & Fuiman 1995; Walther & Thorrold 2006). Positiivne mõju viitab sellele, et kõrgemate elemendi kontsentratsioonidega toidu manustamise korral kaasneb ka konkreetse elemendi sisalduse tõus otoliidis. Üldiselt on toiduga seotud katsetes kasutatud toitu, milles on kunstlikult tõstetud uuritava elemendi sisaldust. Limburg (1995) kasutas aga enda töös looduslikku sööta, magevee zooplanktonit ning merest püütud heeringaid ja krevette. Algselt anti kaladele magevee sööta ning mindi seejärel üle merest pärit toidule. Katsejärgsel analüüsil ilmnis otoliitidel esialgu madal Sr:Ca väärtus ning seejärel kõrge Sr:Ca väärtus, mis oli vastavuses üleminekuga merelisele toidule. Seega Limburgi (1995) töö jõudis üsna kindla positiivse tulemuseni. Ka Engstedt jt. (2012) kasutasid

oma töös nii merelist kui ka magevee toitu. Lisaks sellele manipuleeriti ka soolsusega. Sarnaselt Limburgi (1995) uuringule järeldati tulemustest, et vees leiduv Sr annab otoliidile küll põhilise osa, kuid samas leiti ka küllaltki oluline toidu mõju.

Sr ja Ba ei ole aga ainsad elemendid, millele on uuritud toidu mõju. Ranaldi ja Gagnon (2008) töös *Pagrus auratus*'ega uuriti nii toidu kui ka vee mõju Zn sisaldusele otoliidis. Veest tõstetud Zn sisaldus ei omanud olulist mõju otoliidile. Kunstlikult kõrgendatud Zn sisaldusega toidul oli aga väga oluline mõju otoliidi Zn sisaldusele. Selle tõttu ei ole Zn piisavalt usaldusväärne, et kasutada uuringutes, mis eeldab, et otoliidi mikrokeemia peegeldab otseselt vee keemiat. Toidu mõju arvestades tuleb aga tähele panna, et looduses on enamasti ühe elupaiga/bioomi toit ja vesi on sarnase keemilise koostisega. Üldjuhul ei ilmne looduses sellist olukorda nagu laborikatsete puhul on leitud. Erandid võivad tekkida näiteks siis, kui merekalad söövad mageveest värskest laskunud kalu või vastupidi.

2.2.5.4. Koosmõjud

Looduslikes elupaikades võivad kaladele korraga avaldada mõju mitu keskkonnafaktorit. Seetõttu on oluline teada, mismoodi need faktorid võivad koos mõjutada otoliidi mikrokeemiat. Kõige rohkem on uuritud just soolsuse ning temperatuuri koosmõju nii Sr:Ca kui ka Ba:Ca suhtele, kuid ka siin ei ole jõutud universaalsele tulemusele. Mõningal juhul on leitud koosmõju (Elsdon & Gillanders 2002; Miller 2011; Webb *et al.*, 2012), kuid on ilmnenu ka koosmõju puudumist (Chesney 1998; Webb *et al.*, 2012).

Temperatuuri ja soolsuse positiivne koosmõju ilmneb näiteks siis, kui kindlal soolsusel avaldab temperatuur üksi positiivset mõju vaid teatud temperatuurideni (nt kuni 20 °C), kuid soolsuse tõusuga hakkab mõju avaldama ka siis kui varasemalt seda ei ilmnenu (üle 20° C juures) (Elsdon & Gillanders 2002). Temperatuuri ja soolsuse tugeva positiivse koosmõju korral võivad element:Ca suhted kujuneda näiteks kõrgematel temperatuuridel ja soolsustel kõrgemaks kui muidu. Nende kahe faktori koosmõju korral tuleb kindlasti otoliidi mikrokeemia tõlgendamisel olla ettevaatlik.

Lisaks temperatuuri ja soolsuse koosmõjudele on leitud üsna tugev koosmõju ka

toidukoguse ning kala arenguastme (juveniil, noorkala, täiskasvanud) vahel. Madala toidukoguse korral võivad juveniilsed kalad omastada palju kõrgemaid Sr:Ca ning Ba:Ca suhteid otoliidis, võrreldes nende juveniilidega, kes saavad suuremaid toidukoguseid. Täiskasvanud kalade ning noorkalade puhul sellist asja ei ole täheldatud (Walther *et al.*, 2010). Toidukoguse ning arenguastme koosmõju taga on ilmselt kiirenenud kasv. Kiirema kasvu korral toodetakse kala kehas rohkelt Ca-siduvaid valke ning selle tulemusena võivad kujuneda madalamad element:Ca suhted (Kalish 1989). See tähendab seda, et olenevalt toidukogusest ning kala arenguastmest, võivad ühes kohas elavate kalade otoliitide mikrokeemiad kujuneda oluliselt erinevaks. Selline nähtus võib probleeme tekitada näiteks sõrmejälje meetodi puhul, kus just juveniilsete kalade otoliitide mikrokeemiat kasutatakse alusandmestikuna täiskasvanud kalade tagasimääramiseks.

2.2.6. Otoliitide kasutamine ihtüoloogilistes uuringutes

Uuringuteks kasutatakse kõige rohkem *sagitta* otoliite, sest need on üldjuhul kõige suuremad. Karplaste puhul kasutatakse aga kõige rohkem just *lapillus* otoliite, sest teised otoliidid on sellel kalade sugukonna esindajatel liiga väikesed ning õrnad (Campana & Neilson 1985). Põhiliselt kasutatakse otoliite sõrmejälje meetodi puhul, kala vanuse määramiseks, rännete uurimiseks, otoliidi tuuma uuringuteks ning märgistamiseks.

2.2.6.1. Sõrmejälje meetod

Sõrmejäljeks nimetatakse kalade otoliitide keemilist koostist, mis kujuneb vastavalt sellele keskkonnale, kus kala elab ja viibib. Sõrmejälje võivad moodustada mitmed erinevad keemilised markerid (elemendid) ning nende abil on võimalik iseloomustada kala teatud eluetapi otoliidi keemiat. Sõrmejälje meetodit on muuhulgas kasutatud subpopulatsioonide ning varude eristamiseks (Campana 2000), erinevast jõest püütud kalade eristamiseks (Martin *et al.*, 2013), rännete uurimiseks (Campana *et al.*, 2007) ning koelmutruuduse uurimiseks (Veinott & Porter 2005; Gahagan *et al.*, 2012; Martin *et al.*, 2013). Üldiselt ei ole sõrmejälje loomise ja kasutamise puhul kuigi oluline miks erinevad sõrmejäljed on tekkinud ning millised faktorid (soolsus, temperatuur jne) on nende teket mõjutanud. Oluline on see, et erinevaid keskkondi asustavatel kaladel on

erinevad sõrmejäljed ning need peegelduvad ka otoliitides (Elsdon & Gillanders 2003).

Otoliitide sõrmejälje tuvastamiseks kasutatakse kahte meetodit: terve otoliidi lahustamine ning mingi kindla otoliidi osa ehk transekti uuring. Konkreetse meetodi valik sõltub üldisemast eesmärgist. Terve otoliidi lahustamise meetodit on kasutatud rohkem subpopulatsioonide eristamiseks, kuna see annab väga üldise ülevaate sellest, kas ja milliseid keskkondi on erinevad kalad asustanud ning kas üldine sõrmejalg on kalade vahel erinev (Campana 2005). Mõningal juhul on terve otoliidi lahustamist kasutatud ka rännete uurimiseks (Campana *et al.*, 2007). Maailmameres varieerub Sr kontsentratsioon ning Sr:Ca suhe vaid 2-3% (de Villiers 1999), sõrmejälje meetod pakub seega alternatiivse meetodi, et uurida meres toimuvaid rändeid, sest peale Sr kasutatakse sõrmejälje kirjeldamisel ka muid elemente. Rännete uurimine sõrmejälje meetodi abil, eriti lahustatud otoliidi puhul, ei ole nii täpne kui transekti ning Sr:Ca suhte kasutamine. Küll aga on sõrmejälje abil võimalik kindlaks teha kas kalad on rännanud ühest kohast teise või viibinud mõnes teises elupaigas (Campana *et al.*, 2007). Rännete uurimiseks on kasutatud ka transekti (Mercier *et al.*, 2012). Transekti kasutamine on täpsem ning peenem ja transekti abil on võimalik leida otoliidilt mingi kindla eluetapi sõrmejalg. Rännete uurimisel on transekti abil võimalik üsna täpselt iseloomustada seda millal kala ränne toimus ja kui kaua näiteks ühes kohas viibiti. Samuti sobib transekti kasutamine kalade täpsemaks eristamiseks ning siis kui tahetakse uurida tagasipöördumist sünnikohta.

Enne kui sõrmejälje meetodit saab kasutada näiteks populatsioonide eristamiseks, täiskasvanud kalade tagasipöördumise uurimiseks ning parimate kudejõgede leidmiseks, tuleb kindlaks teha, kas erinevatel populatsioonidel ning ka erinevates geograafilistes punktides asuvatel kaladel esineb variatsiooni sõrmejälje koostises (Thorrold 1998). Martin jt. (2013) uurisid Prantsusmaa Adour'i jõe vesikonna lõhet (*Salmo salar*) eesmärkidega iseloomustada erinevate lisajõgede vee keemiat, leida igale jõele iseloomulik otoliidi sõrmejalg ning uurida otoliidi sõrmejälje ja vee keemia vahelist seost. Algselt plaaniti kasutada nii Sr, Ba, ⁸⁷Sr:⁸⁶Sr, Mg, Mn kui ka Rb kuid kolm viimast elementi jäeti analüüsist välja, kuna nende elementide sisaldus vees ei olnud otseselt seotud otoliidi keemiaga. Sõrmejälje leidmiseks kasutati transekti uuringut otoliidi kõige äärmisemast osast, sest see on moodustunud kõige viimasena ja selle tõttu peegeldab kõige paremini vee keemiat ning otseselt seda keskkonda, kus konkreetne

kala oli viibinud. Tulemustest ilmnnes, et noorte lõhede otoliidi sõrmejäljed olid igale jõele omased ning võimaldasid eristada erinevast jõest püütud kalu.

Engstedt jt. (2013) uurisid tagasipöördumist sünnikohta Läänemere haugidel (*Esox lucius*). Sõrmejälje loomiseks kasutati otoliidis kõige levinumaid elemente: Sr, Zn, Br, Co, ja Mn. Antud töö viidi aga veel sammu võrra edasi ning lisaks kalade noorjärkudele püüti ka kudema naasnud täiskasvanuid, et leida kui suures ulatuses haugid oma kodujõkke tagasi kudema tulevad. Tagasipöördumise uurimiseks leitakse täiskasvanud kala otoliidilt see osa, mis on moodustunud kala viibimisel magedas vees ehk oma kodujões ning võrreldakse seda jõgede noorjärkude veekeemiaga või jõgede veekeemiaga. Selliselt on võimalik kindlaks teha kõige paremad või ka halvemad kudejõed. Parimad peaks sel juhul võtma kaitse alla ning halvimate juhul välja selgitama, mida oleks võimalik neid parandada.

2.2.6.2. Vanuse määramine

Traditsiooniliselt määratakse kalade vanust otoliitide kasvurõngaste abil. Selliselt on võimalik vanust määrata nii päevasel kui ka aastasel skaalal. Üldjuhul saab päevast skaalat kasutada vaid noorte kalade puhul, sest vanematel kaladel ei ole enam päevaseid kasvurõngaid nii hästi näha (Pannella 1971). Keemilisel vanuse määramisel kasutatakse radioisotoope. Radioisotoope seotakse otoliiti samamoodi kui stabiilseid isotoope. Otoliidis hakkavad need isotoobid aga lagunema ning varem teadaoleva poolestusaja järgi ongi võimalik kindlaks teha kala vanus. Radioisotoobid võivad olla nii looduslikud kui ka inimtekkelised. Viimased on tekkinud 1950-1960. aastatel toimunud tuumapommi katsetuste tagajärjel (Andrews *et al.*, 2013). Inimtekkelistes isotoopidest kasutatakse kala vanuse määramiseks kõige rohkem just ^{14}C ehk süsinik-14 isotoopi (Campana 1999). Looduslikest radioisotoopidest kasutatakse ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{228}Th ja ^{238}U isotoope ning nende suhteid. On leitud, et kõige parem on kasutada Po:Pb suhet kuni 1-aastaste, Th:Ra kuni 8-aastaste ja Pb:Ra kuni 50- aastaste kalade vanuse määramiseks (Campana 1999). Looduslike radioisotoope kasutades on näiteks Th:Ra puhul võimalik vanust määrata kuni 1-aastase täpsusega ning Pb:Ra puhul kuni 5-aastase täpsusega (Campana 2001).

2.2.6.3. Rännete uurimine

Nagu sõrmejälje meetodi puhul, kasutatakse ka rännete uurimisel peamiselt mingit kindlat osa otoliidist, enamasti transekti tuumast servani. Vahe on aga selles, et rännete uurimise puhul kasutatakse lisaks veel ära ka otoliidi kronoloogilised omadused ehk see, et kogu materjal on otoliidile ladestunud kasvurõngastena. Kõrvutades otoliidi transektilt saadud infot otoliidi kronoloogilise infoga, on võimalik rändeid uurida näiteks vanuse või kuupäeva kaupa (Campana 1999).

Kindlasti on kõige rohkem uuritud otoliitide abil just diadroomseid rändeid ehk kalade liikumist soolase ning mageda vee vahel (Limburg *et al.*, 2001; Gahagan *et al.*, 2012; Rohtla *et al.*, 2012) ning seda peamiselt Sr:Ca suhte abil. Gahagan jt. (2012) uurisid kahe heeringalise – siniselg-aloosa (*Alosa aestivalis*) ja hallselg-aloosa (*Alosa pseudoharengus*) anadroomseid rändeid. Seda tehti Sr:Ca ning Ba:Ca suhete abil. Otoliidist võeti proov läbi tuuma servani, et teha kindlaks terve kala elukäik. Iga kala rände kohta leiti eraldi profiil, kõrvutades otoliidilt mõõdetud transekti Sr:Ca suhet otoliidi kasvurõngastelt saadud infoga. Profiililt oli võimalik välja lugeda, mismoodi iga individuaalne kala oli täpselt merre rännanud. Antud töö kaladest olid enamus rännanud merre otse, teistel juhtudel olid kalad aga liikunud enne täielikult merre laskumist soolase ja mageda vee vahet.

Ainult magevee või mere rändeid uurides ei ole aga Sr:Ca suhtest abi, sest puudub sooluse gradient (de Villiers 1999). Merelisi rändeid on uuritud näiteks sõrmejälje meetodi abil (vt pt 2.2.6.2). Kuna veekogude aluspõhja iseloom ja vanus määravad ära selle, kui palju vees sisaldub Sr isotoope (^{87}Sr , ^{86}Sr) (Löfvendahl *et al.*, 1990), on magevee rändeid uuritud ^{87}Sr : ^{86}Sr suhte abil (Benjamin *et al.*, 2013)

2.2.6.4. Otoliidi tuuma kasutamine

Otoliidi tuuma uuringud on seotud ennekõike emapunkti uurimisega. Emapunktiks (inglk.: *mother peak*) nimetatakse otoliidi tuumalt mõõdetud Sr:Ca väärtust. See on moodustunud enne kala rebukoti kadumist ning selle koostis sõltub emase kala vitellogeneesi aegsest keskkonnast. Vitellogenees ehk rebu moodustumine toimub anadroomsetel kaladel reeglina merevees. Rebus sisalduvad ained on pärit keskkonnast, kus on viibinud emane kala, ning need kanduvad edasi ka järglaste otoliitide tuuma (Kalish 1990). Just selle tõttu on emapunkti uurimise abil võimalik osaliselt anadroomsete liikide (nt forell, haug) puhul kindlaks teha konkreetse isendi ema

päritolu (kas tegu on anadroomse või mitteanadroomse isendi järglasega) (Mills *et al.*, 2012; Courter *et al.*, 2013). Selleks kasutatakse emapunktis sisalduvat Sr:Ca suhte väärtust, kuna Sr sisaldus soolases vees on mitu korda kõrgem kui magedas vees. Vastavalt sellele peaks ka anadroomsete kalade järglaste tuumas olema tunduvalt kõrgem Sr:Ca suhe kui ülejäänud otoliidis.

Otoliidi tuuma uuringute käigus on leitud, et lisaks Sr, mis võib omada tuumas kõrgeid väärtusi, on ka Mn sisaldus tuumas tunduvalt kõrgem kui ülejäänud otoliidis (Brophy *et al.*, 2004). Kõrgenenud Mn sisaldust on nt kasutatud selleks, et tuuma piirkonda otoliidis üles leida ning veenduda, et transekt kulgeb üleotoliidi tuuma (Ruttenberg *et al.*, 2005; Veinott *et al.*, 2014), sest mõningate uuringute puhul on tuuma läbimine väga oluline. Tuuma kõrgenenud Mn näidu puhul on aga tegemist puhtalt füsioloogilise omapäraga ja see ei sõltu keskkonnast.

2.2.6.5. Märgistamine

Kalu märgistatakse väga erinevatel eesmärkidel, kuid üheks enimlevinumaiks on kasvandusest pärit kalade märgistamine. Seda tehakse selleks, et eristada kasvatuses kalu looduslikest ning seeläbi hinnata kasvatuses kalade ellujäämist ning segunemist looduslike populatsioonidega. Kuna reeglina asustatakse väga palju ja väikeseid kalu, siis nende individuaalne märgistamine on äärmiselt kulukas (nii ajaliselt kui ka rahaliselt). Seetõttu on väljatöötatud lisameetodid. Üheks selliseks on otoliitide keemiline märgistamine, mis võimaldab kuluefektiivselt märgistada suure hulga kalu nii, et kaladele ei tekitata ka täiendavat stressi, mis võib tekkida näiteks individuaalse märgistamise puhul (Volk *et al.*, 1999).

Otoliitide märgistamist teostatakse üldiselt vannitamise meetodil, mis tähendab seda, et kalu hoitakse vees, milles on mingi kindla elemendi sisaldust tõstetud ebatavaliselt kõrgeks (Munro *et al.*, 2009; Unfer & Pinter 2013). Keemilise markeerimise puhul kasutatakse kõige rohkem fluorestseeruvaid ühendeid, mis seostuvad kaltsiumiga. Üldiselt omandavad kalad neid ühendeid hästi ning samuti jääb fluoresteeruvate ühenditega markeerimise tulemusena otoliidile selge märg kui otoliiti vaadata UV-valguses (Campana 1999). Fluoresteeruvate ühendite abil on suudetud märgistada ka alles marjateras olevaid vastseid (Unfer & Pinter 2013). Väga edukaks on osutunud ka

märgistamine toidu (Woodcock *et al.*, 2013) ning temperatuuri muutuste abil (Volk *et al.*, 1999; Song *et al.*, 2008). Temperatuuriga märgistamise korral tekib vaid visuaalne märg. Keemilisel markeerimisel või toitu kasutades tekib otoliidile aga keemiline ja/või visuaalne märg.

2.3. Jõed

2.3.1. Jõgede iseloomulikud omadused

Jõgi koos lisajõgedega moodustab jõestiku. Jõestiku eripära on tihedalt seotud ümbritseva reljeefi, geoloogiaga, jõesärgi iseloomu ja kliimaga. Vee keemiline koostis muutub pidevalt kui vesi läbib erinevaid maakera sfääre. Vett mõjutavad nii antropogeensed kui ka looduslikud faktorid. Kõik see põhjustab jõgedes vee suuri keemilisi erinevusi (Khublaryan 2009). Jõgede vee eripära on eelkõige väga kiire veevahetus. Selle tõttu ei jõua vesi atmosfääriga interakteeruda, mille tulemuseks on küllaltki madal mineraliseerumine ($50 - 1000 \text{ mg l}^{-1}$). Jõgedele on ka väga iseloomulik veekeemia aastaajaline varieeruvus. Selle tõttu on tavaline, et kevadise kõrgvee ajal on ainete sisaldus vees madalam kui näiteks suvisel madalvee perioodil (Khublaryan 2009).

Jõed toituvad peamiselt sademetest, lumesulavetest ning põhjaveest. Nende osakaal on vastavalt ligikaudu 43%, 24% ja 33% (Simm 1975). Kõige rohkem põhjavett jõuab jõkke suviti ning talviti, kui jões on veetase madal. Vee temperatuur jõgedes sõltub peamiselt päikeseekiirguse hulgast. Vee soojenemise ning jahenemise kiirus sõltub aga veemassi suuruselt. Mida väiksem on veemass, seda kiirem on soojenemine. Vee temperatuuri muutus jões mõjutab nii jää tekkimist/kadumist kui ka keemilisi ning bioloogilisi protsesse (Dolotov & Zekster 2009).

2.3.2. Jõgede veekeemia ja selle kujunemine

Täiesti puhast vett esineb looduses harva. Tavaliselt sisaldab vesi ka teatud määral lahustunud või lahustumata osakesi (Aleksievskiy 2009). Üldiselt on jõevesi madala mineraalainete sisaldusega ning jõeveet loetakse magedaks. Mineraalainete sisalduse alusel jagatakse jõgesid madala (alla 200 mg/l), keskmise ($200\text{-}500 \text{ mg/l}$), kõrge (alla 200 mg/l) ning kõrge (üle 1000 mg/l) mineraalainete sisaldusega jõgedeks (Dolotov & Zekster 2009). Enamik jõgesid on väikese kuni keskmise mineraalainete

sisaldusega (Alekseevskiy 2009). Erinevate veekogude vee keemia kujunemist looduslikul teel mõjutavad erinevad faktorid. Olulised on füüsikalised-geograafilised, geoloogilised, keemilised ning keemilis-füüsikalised faktorid, lisaks veel bioloogilised ning antropogeensed mõjurid (Nikanorov & Brazhnikova 2009). Jõgede keemilise koostise kujunemine saab alguse sademete langemisest maapinnale, seejärel nõrguvad sademed läbi mulla ning pinnase. Eestis avaldab jõgede veekeemia kujunemisele olulist mõju aluspõhja settekivimid, eriti erinevate ajastute karbonaatsed kivimid (Simm 1975).

Jõgede vee keemia on väga muutlik ning sõltub oluliselt sademetest ning vooluhulgast (Dolotov & Zekster 2009). Üldiselt on peamiste ionide kontsentratsioon vees küllaltki hästi korreleerunud vooluhulgaga. Mida suurem on vooluhulk, seda väiksem on ionide kontsentratsioon, seda eelkõige lahjendamise efekti tulemusena. Tugevate sademete ning ka lumesulamisvete viibeag mullas on väga lühike ning selle ajaga ei jõua vette väga palju ioone. Madalvee perioodil saab jõgi kõige rohkem vett põhjaveest ning sügavamatest mullakihtidest. Seal on aga aluspõhja murenemine kõige intensiivsem ning selle tulemusena tekib vees ka kõrgem ionide kontsentratsioon (Jarvie *et al.*, 2000). Eestis on näiteks leitud, et kevadise suurvee ajal on jõgede keskmine mineraalainete sisaldus kõige madalam (150 mg/l). Mineraalainete sisaldus on sel ajal kõige kõrgem Pandivere kõrgustiku aladel, seda eelkõige karstialade ja allikate mõjul. Kõige madalama mineraalainete sisaldusega on kevadise suurevee ajal Vahe-Eesti jõed (<125 mg/l). Suvised ning talvised madalvee perioodid on jõgede keskmine mineraalainete sisaldus kõrgeim (>450 mg/l). Sel ajal on endiselt kõige kõrgem mineraalainete sisaldus Pandivere kõrgustiku jõgedes ja kõige madalam Vahe-Eestis ning jõgedes, mis on tugevasti mõjutatud soodest (Simm 1975).

Jälgelementide puhul ei ole nii selget seost vooluhulgaga leitud, mis viitab sellele, et jälgelementide jõudmine vette on keerukam. Ba ning Sr puhul on leitud sarnane seos vooluhulgaga, nagu seda on peamistel ionidel. Ehk mida suurem on vooluhulk, seda madalam on nende kontsentratsioon. Seda selle tõttu, et Ba ja Sr pärinevad samuti peamiselt kivimite (eriti lubjarikaste) murenemisest (Jarvie *et al.*, 2000). Ba kontsentratsiooni vees on seostatud bariidi lahustuvusega (Cánovas *et al.*, 2007). Teised metallid käituvad aga teisiti, nt Al ja Fe on vooluhulgaga hoopis positiivselt seotud. Mn, Cr, Co, Zn, Cd, Pb ning Cu sisaldus vees ei ole aga vooluhulgaga seotud. Nende

päritolu on selle tõttu raske hinnata, tõenäoliselt on neil elementidel mitmeid, sealhulgas antropogeenseid, allikaid (Jarvie *et al.*, 2000). Antropogeensed faktorid (näiteks metsade langetamine, soode kuivendamine ning põllumajandus) võivad oluliselt mõjutada vee keemiat (Dolotov & Zekster 2009). Eesti jõgede uurimisel on leitud, et põlevkivi kaevandamine on üks suuremaid antropogeenseid mõjureid, mis võib tõsta jõgede setetes Sr hulka (Szava-Kovats 2001).

Ajaline varieeruvus jõgede mineraalainete sisalduses võib olla kuni 1000%, kõige selgemini on seda näha just väikeste jõgede puhul, mille valgala on alla 100km². Suuremates jõgedes võib esineda ka suuri ruumilisi varieeruvusi, sest valgala eri paikades on jõesäng erinevat iseloomu (Alekseevskiy 2009). Üldiselt muutub jõe veekeemia rohkem pikkuses (vähem sügavuses või laiuses). Eriti suur on see muutus pikkade jõgede puhul, mis läbivad erinevaid füüsikalisi-geograafilisi tingimusi (Nikanorov & Brazhnikova 2009). Looduses on vees leiduvate ionide kontsentratsioon sõltuv peamiselt settekivimite lahustumisest ja leostumisest ning taimse ja loomse päritolu ainese lagunemisest ning oksüdeerumisest (Alekseevskiy 2009). Katioonide sisaldus sõltub lisaks veel nende ainete liikuvusest (lahustuvusest) ning bioloogilisest olulisusest (elusorganismide omastamise määrast).

2.3.3. Peamised ioonid

Kõikide mineraalide sisaldus vees sõltub kahest faktorist: teatud keemilise elemendi kättesaadavuses maakoos ja selle elemendi lahustuvusest vees (Nikanorov & Brazhnikova 2009). Vees lahustunud mineraalaineid saab jaotada mikro- ja makroosakesteks, viimased moodustavad suurema osa (kuni 90%) lahustunud mineraalidest. Anioonidest leidub Cl⁻, SO²⁻, HCO³⁻, CO³⁻² ning katioonidest Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ ja K⁺. Need on ka peamised ioonid, mida jõeveest võib leida, ülekaalus on nendest enamasti just Ca²⁺. Kaltsium- ning magneesiumioonid jõuavad vette peamiselt mulla ning kivimite leostumise tulemusena (Simm 1975). Ca²⁺ pärineb peaaegu täielikult karbonaatsetest kivimitest (paekivi, dolomiit), kui süsihape neid kivimeid lahustab. Väga vähesel määral jõuab Ca jõkke ka antropogeensest reostusest ning atmosfäärist (Allan & Castillo 2008). Magneesiumi kontsentratsioon vees ei ole üldiselt väga mõjutatud inimtegevusest. Cl⁻ ja Na⁺ on väga levinud selle tõttu, et erinevad kivimid, millest need elemendid pärinevad, on vees küllaltki hea lahustuvusega (Nikanorov & Brazhnikova 2009). Lisaks sellele on leitud, et nii Cl kui ka Na sisaldus vees võib

tugevasti sõltuda antropogeensetest mõjudest. Näiteks talvine teede soolamine võib tõsta erinevates vooluveekogudes oluliselt Cl sisaldust (Allan & Castillo 2008). Cl⁻ ja ka Na⁺ väga kõrget näitu vees on mõningal juhul loetud selgeks märgiks antropogeensele reostusele (Voss *et al.*, 2014).

Mikroelemente leidub vooluveekogudes väga väikestes kogustes (Alekseevskiy 2009). Selle põhjuseks on peamiselt see, et mikroelemente, nagu nimigi viitab, leidub maakoores väga vähesel hulgal ning tihti on nad ka halva lahustuvusega (Nikanorov & Brazhnikova 2009). Põhilisteks mikroelementideks vees on Li, Rb, Cs katioonid; Br, I, F, B anioonid; raskemetallid Fe, Cu, Au, Ni, Zn ning radioaktiivsed elemendid nagu ⁴⁰K, ⁸⁷Rb, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ⁹⁰Sr jne. Lisaks sellele leidub vees veel lahustunud gaase nagu O₂, CO₂, NH₃ ja SO₄, mis jõuavad vette peamiselt atmosfääri kaudu. Vees on ka vee-elustikule vajaminevaid toitained, nagu N, P, Si ja Fe, erinevat päritolu orgaanilist ainet ning inimtegevuse tagajärjel vette jõudnud reostusained (Alekseevskiy 2009). Räni leidub vees üldiselt vähe, sest seda sisaldavad kivimid ja mineraalid on halva lahustuvusega. Samuti on räni vajalik mitmetele elusorganismidele, mistõttu kasutatakse räni veest ära (Nikanorov & Brazhnikova 2009). Al, Fe ja Mn on üldiselt litogeenset päritolu ning viitavad setetes olevatele mineraalidele. Näiteks Al on palju savides ning alumiiniumsilikaatides. Ka Sr ning Ba on seostatud peamiselt geoloogiaga, eelkõige lubjakiviga, sest neid elemente võib leida näiteks kaltsiidis. Zn ja Pb allikateks võivad olla mitmed tardkivimid. Raskemetallide, nagu Cu, Cr, Ni, kõrged väärtused viitavad aga enamasti antropogeensele mõjule, mitte aga aluspõhja iseloomule (Jarvie *et al.*, 2000).

2.3.4. Eesti jõed

Eesti jõed võib vastavalt hüdrokeemiale jagada kolme erinevasse regiooni: Põhja-Eesti, Vahe-Eesti ja Kirde-Eesti regioon ning Lõuna-Eesti regioon. Käesoleva tööga on kõige tihedamini seotud kaks esimest, mistõttu on nendest antud järgnevalt täpsem ülevaade (Simm) 1975 põhjal.

- Põhja-Eesti regioon jaguneb kaheks allregiooniks: Pandivere kõrgustiku allregiooniks ning Loode-Eesti regiooniks. Pandivere allregiooni kuuluvad sellised jõed, nagu Kunda jõgi, Valgejõgi, Loobu jõgi, Toolse jõgi, Selja jõgi, Padajõgi, Vainupea oja, Mustoja, Altja oja ja Võsu jõgi. Loode-Eesti regiooni kuuluvad Vasalemma jõgi, Keila jõgi,

Vääna jõgi, Höbringi oja, Riguldi jõgi, Nõva jõgi, Jägala jõgi, Kloostri oja, Kõrtsioja ning Kaldamäe oja. Regiooni iseloomustab paene aluspõhi ning tugev allikate mõju (eriti Pandivere allregioonis). Regiooni jõgedele on omane suurim mineraalainete üldsisaldus, suurim Ca sisaldus (eriti Loode-Eesti allregioonis) ning väiksem rauaühendite sisaldus võrreldes teiste regioonidega.

- Vahe-Eesti ja Kirde-Eesti regioon jaguneb Pirita jõe allregiooniks ning Pärnu jõe ja Vihterpalu jõe allregiooniks. Lisaks sellele kuuluvad siia regiooni veel Pudisoo jõgi, Timmkanal, Häädemeeste jõgi, Männikuoja ja Tõstamaa jõgi. Regiooni põhjapoolsetele osadele on iseloomulik aluspõhjas olev lubjakivi ning dolomiit, lõunaosadele dolomiit, savid ning liivakivi. Lisaks sellele avaldavad selles regioonis olevatele jõgedele suurt mõju ka soomassiivid. Selle tõttu on selle regiooni jõgede rauaühendite sisaldus suur, kuid rauaühendite oleneb ka soo tüübist. Vihterpalu ning Pudisoo jões on rauaühendite sisaldus regiooni kõrgeim. Pärnu ja Vihterpalu allregioonis on jõgedes kõige väiksem üldine mineraalainete sisaldus Eestis.

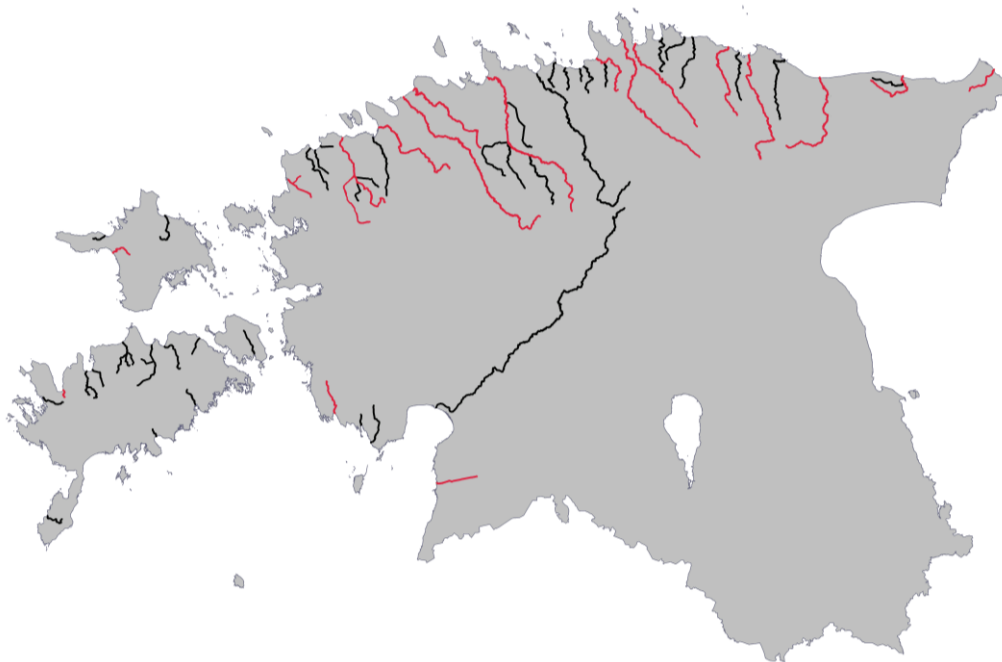
3. Materjal ja metoodika

3.1. Kalade ja veeproovide kogumine.

Forellid (n=257) koguti elektripüügiga 2012. aasta augustis ja septembris. Kalu koguti Põhja-Eesti rannikult, Hiiumaalt, Saaremaalt ja Pärnumaalt. Kokku koguti kalu 19 jõest (kokku 25 punktist; joonis 1; lisa 1). Kalad koguti riikliku andmekogumise programmi raames lõheliste seire käigus. Lisaks sellele koguti kalu (n=46) ka Soome kolmest jõest – Ingarskila, Longinoja ja Mustajoki ning kahest Soome kalakasvatusest Trollbölest ja Hankasalmist. Soomest pärinevad kalad aitavad iseloomustada ka suuremaskaalalist sõrmejälje varieeruvust.

Veeproove koguti kolmel korral. Esimesed proovid koguti samuti riikliku lõhe ning meriforelli seire käigus 2012. aasta augustis ja septembris. Kuna veeproove koguti riikliku seire käigus, olid proovivõtu kohad juba eelnevalt fikseeritud. Esimese proovivõtu käigus koguti kokku proove 81 erinevast punktist üle Eesti (lisa 1). Lisaks sellele koguti valitud jõgedest proove ka 2013. aasta veebruaris ning 2013. aasta juunis. Selles valikus on esindatud eelkõige Eesti kõige olulisemad ning suuremad meriforelli kudejõed ning samuti jõed, kus oli proove võetud rohkem kui ühest punktist eesmärgiga

uurida jõgedesisest veekeemia varieeruvust. Veeproovid koguti süstla abil ning filtreeriti läbi 45 µm nailonfiltrit. Süstalt loputati enne veeproovi filtreerimist vähemalt kolm korda konkreetse proovivõtu punkti veega. Peale süstla loputamist täideti see uuesti veega (20ml), paigutati süstlale filter ning filtreeriti 10 ml vett maha, ülejäänud 10 ml kasutati veeproovi kogumiseks mõeldud topsi loputamiseks. Peale topsi loputamist eemaldati filter, täideti süstal jällegi 20 ml veega ning filtreeriti läbi sama filtri topsi. Peale lõpliku veeproovi filtreerimist lisati proovile kohe 2 ml 5%-list HNO₃ hapet, et proov fikseerida. Kõik proovid asetati esimesel võimalusel kuni proovide analüüsimiseni külma.



Joonis 1. Eesti jõed kust koguti proove. Punasega on tähistatud jõed kust koguti nii veeproove kui ka meriforellide noorjärke. Mustaga on märgitud jõed kust koguti ainult veeproove.

3.2. Otolitiide eemaldamine laboris ja ettevalmistamine analüüsiks.

Laboris sulatati kalad ning eemaldati *sagitta* otoliitide paar. Otoliididelt eemaldati koetükid, loputati vees ning jäeti õhu kätte kuivama. Kuivanud otoliitide paarist valiti juhuslikult üks, mida kasutati edasises analüüsis. Juhul kui mõni otoliit oli vateriitne, jäeti see analüüsist kõrvale ning valiti teine. Sama tehti ka siis, kui silmaga oli selgelt näha, et otoliit oli väga mõrane (võib tekitada probleeme edasise töötamise käigus). Väljavahitud otoliit liimiti klaasist alusele ning lihviti käsitsi kuni tuumani. Lihvimist teostati P 1200 ja P 2500 liivapaberitega. Õhiku poleerimiseks kasutati P 4000 paberit.

Kogu lihvimistegevuse ajal kontrolliti lihvimise ulatust mikroskoobi abil. See on vajalik selleks, et lihvimine tuuma nähtavale ilmumisel lõpetada. Juhul kui lihvimise käigus lihviti ära ka otoliidi tuum, siis seda otoliiti edasises analüüsis ei kasutatud ning võimalusel võeti kasutusele teine otoliit. Liimitud otoliit kleebiti omakorda uuele alusklaasile, kleepimise järjekord määras ühtlasi ära ka keemilise analüüsi järjekorra.

3.3. Otoliite mikrokeemilised analüüsid

Otoliitide mikrokeemia analüüsid teostati Ameerika Ühendriikides Oregoni osariigi ülikooli WM Keck ICP-MS laboratooriumis. Analüüsid teostati laserablatsioonüsteemiga varustatud induktiivseondatud plasma mass-spektromeetriga (LA-ICPMS). Elementid ning Sr isotoobid analüüsiti eraldi. ^{87}Sr : ^{86}Sr jaoks kasutati mass-spektromeetrina NuPlasma multikollektorit. Otoliidid olid alusklaasile kleebitud kordamööda erinevatest punktidest, et analüüsimise järjekord oleks võimalikult juhuslik. Lisaks sellele mõõdeti isotoopide puhul iga kahe ning elementide puhul iga 15 otoliidi tagant välist standardit (ookeani limuse lubikoda ning NIST 612). Juhuslikustamine ning standardite mõõtmise otoliitide vahepeal on ICPMS-iga analüüsimise puhul oluline sellepärast, et aja möödudes võib masinal tekkida mõningane nihe mõõtmistulemustes. Seda peamiselt temperatuuri, plasma ning elektronide muutuste tõttu (Campana 1994). Standardite abil on hiljem võimalik mõõtmistulemusi korrigeerida ja toorandmeid teisendada. Esmalt mõõdeti otoliidilt elementide (^7Li , ^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{43}Ca , ^{55}Mn , ^{59}Co , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{85}Rb , ^{86}Sr , ^{88}Sr , ^{107}Ag , ^{137}Ba , ^{138}Ba ning ^{208}Pb) sisaldus.

Elementide transekt algas tuuma välispiirilt ning kulges otoliidi pararostrumi suunas. Elementide transekt oli, sõltuvalt otoliidi suurusest, 40 μm lai ning maksimaalselt 400 μm pikk. Elemente mõõtes liikus laser 7 Hz sagedusega piki otoliiti kiirusega 5 $\mu\text{m s}^{-1}$. Sr isotoopide (^{87}Sr , ^{86}Sr) mõõtmise transekt kulges paralleelselt elementide transektiga. Isotoope mõõdeti samuti 5 $\mu\text{m s}^{-1}$, kuid 10 Hz sagedusega ning isotoopide mõõtmisel oli laserikiire läbimõõt 65 μm . Edasises andmetöötles ning analüüsides kasutati vaid ^{43}Ca , ^{55}Mn , ^{85}Rb , ^{86}Sr , ^{138}Ba , ^{208}Pb ning ^{86}Sr : ^{87}Sr väärtusi. Algselt oli andmetöötles sees ka ^{66}Zn , kuid see element jäeti hilisematest analüüsides välja, kuna on leitud, et Zn sisaldust kala otoliidis mõjutab ka toit (Ranaldi & Gagnon 2008) ning ei peegelda seetõttu otseselt vee keemiat. Andmetöötles käigus kalibreeriti elementide näidud

NIST 612 standardiga ning isotoopide mõõtmistulemus ookeani lubikoja standardiga ning arvutati välja ka element:Ca suhted.

Veeproovide analüüsid teostati Eestis Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituudi ICP-MS laboris. Veeproovide analüüsimiseks kasutati X series II ICPSM seadet ning CETAC ASX100 proovide automaatsisestajat (CETAC Technologies Inc.). Claritas PPT multielementstandardeid CLMS-1 ja CLMS-2 kasutati veeproovide väliseks kalibreerimiseks. Analüüsi kvaliteedi kontrollimiseks kasutati NIST veestandardit 1643e. Veeproovidest mõõdeti Li, Na, Mg, K, Ca, Sc, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Cd, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th ja U väärtusi.

3.4. Andmeanalüüs

Andmeanalüüsi jaoks kasutati nii mitteparameetrilisi kui ka mitmemõõtmelisi meetodeid. Kuna jõgede puhul oli nii punkte (jõgesid) kui ka muutujaid (elemente) väga palju, kasutati peakomponentanalüüsi kõige esimeste, sügise proovidega, et leida, millised elemendid on jõgede eristamiseks kõige olulisemad. Veeproovide puhul ei saanud kasutada diskriminantanalüüsi, kuna sügisel oli igat jõest kogutud vaid üks proov. Diskriminantanalüüsis on aga nõutud, et igas grupis peab olema vähemalt kaks vaatlust (proovi) (McGarigal *et al.*, 2000). Peakomponentanalüüsi kasutati ka selleks, et leida, millised jõed võivad silma paista oma veekeemia poolest. Peakomponentanalüüs on kirjeldav andmeanalüüs, mille abil on küllaltki lihtsalt võimalik suurt hulka andmeid vähendada ning kasutada neid andmeid edasiste järelduste tegemiseks. Peakomponentanalüüsi tulemuseks on uued peakomponendid, mis on algsete muutujate lineaarne kombinatsioon. Lisaks sellele on peakomponentanalüüsi tulemuseks ka "laadungid", mis väljendavad iga algse muutuja olulisust kindla peakomponendi suhtes. Laadungite ning esialgsete muutujate alusel luuakse "skoorid", mida võib lugeda ka uute muutujate ehk peakomponentide väärtusteks, mille abil on võimalik tulemusi tõlgendada (Olsen *et al.*, 2012). Erinevate vesikondade vee kvaliteedi hindamises on peakomponentanalüüs kasutust leidnud ka varem (Yidana *et al.*, 2008; Olsen *et al.*, 2012). Peakomponentanalüüsile eelnevalt töödeldi andmeid neljanda astmega, et neid ühtlustada ning saavutada normaaljaotus.

Peakomponentanalüüsi kasutati ka kõigi kolme veeproovi võrdlemiseks. Selleks tehti peakomponentanalüüs nii sügise, talve kui ka suve veeproovidega ning hiljem võrreldi saadud peakomponente mitteparameetrilise Friedman ANOVA-ga. Friedman ANOVA valiti selle tõttu, et proovid olid omavahel seotud. Mitteparameetrilist meetodit kasutati selle tõttu, et andmed ei olnud normaaljaotusega. Sama testiga võrreldi ka veeproovide element:Ca sisaldust sügise, talve ning suve proovides. Peakomponent analüüsi abil tehti kindlaks ka Sr isotoopide tähtsus jõgede eristamises. Kuigi antud töös mõõdeti ^{87}Sr ja ^{86}Sr väärtusi ainult kalade otoliitidelt, kasutati neid koos veeproovidega, sest varasemalt on leitud, et $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr jõuavad otoliitidesse proportsionaalselt samas koguses, mis neid leidub vees (Martin *et al.*, 2013).

Otoliidi mikrokeemia andmeanalüüsiks kasutati samuti mitteparameetrilist testi. Erinevast jõest püütud kalade element:Ca omavaheliseks võrdlemiseks kasutati Kruskal-Wallise mitteparameetrilist testi, kuna andmed ei olnud omavahel seotud ning puudus ka normaaljaotus. Et selgitada välja, millised elemendid panustavad kõige rohkem erinevast jõest püütud kalade eristamisel, kasutati kanoonilist diskriminantanalüüsi. Diskriminantanalüüsi üheks eesmärgiks on leida gruppide kõige parem omavaheline eraldamine analüüsis olevate muutujate abil. Selle eraldamise aluseks on muutujatevaheliste lineaarsete funktsioonide leidmine, mis seejärel kõige paremini grappe eristaks. Neid lineaarseid funktsioone nimetatakse ka kanoonilisteks funktsioonideks ning neid defineeritakse ka kui kaalutud lineaarkombinatsiooni algsetest muutujatest. Ehk igat muutujat "kaalutakse" vastavalt tema võimele eristada grappe. Teine diskriminantanalüüsi eesmärk on leida, milline muutuja panustab kõige rohkem gruppide eristamisse (McGarigal *et al.*, 2000). Seega on diskriminantanalüüsi abil võimalik kindlaks teha, kas erinevast jõest püütud kalad (grupid) omavahel eristuvad, neid erinevusi on võimalik visualiseerida ning samuti on võimalik leida, millised elemendid sellesse kõige rohkem panustavad (kanoonilised muutujate koefitsiendid). Selle ja eelkõige hilisemate tööde jaoks on kõige olulisem diskriminantanalüüsi omadus isendite tagasiklassifitseerimine eelnevalt piiritletud gruppidesse (jõgedesse). Kuna andmed ei olnud normaaljaotusega, kasutati enne diskriminantanalüüsi teostamist andmetel log-töötlust. Andmeanalüüsi teostamiseks kasutati STATISTICA 7 programmi. Ma teadvustan, et konkreetseim viis tagasiklassifitseerimiseks oluks kahe andmera kogumine, kus ühte kasutatakse tagasiklassifitseerimisreeglite välja töötamiseks ning teist selle kontrollimiseks. Antud

töös ei olnud aga kahe andmera kogumine ja analüüsimine rahaliselt ning looduskaitsealiselt teostatav. Algandmete abil on tagasiklassifitseerimisereegleid leitud ka teistes uuringutes (Thorrold 1998; Barnett-Johnson 2008; Gahagan *et al.*, 2012; Martin *et al.*, 2013). Selles töös noorkalade põhjal väljatöötatud tagasiklassifitseerimisereegleid kasutatakse tulevikus merest püütud täiskasvanud kalade sünnijõgede väljaselgitamiseks.

4. Tulemused

4.1. Veeproovide tulemused

Peakomponentanalüüsi (PC) kasutati selleks, et näha, millised elemendid panustavad veekeemia erinevusse kõige rohkem. Esimene peakomponent (PC) seletas kogu hajuvusest ära 56,2 %, teine peakomponent 15,2 % ja kolmas peakomponent 6,0 % . Kokku seletasid esimesed kolm peakomponenti ära 77, 4%. Kõikide elementide laadungid ning jõgede skoorid on toodud lisades 2 ja 3.

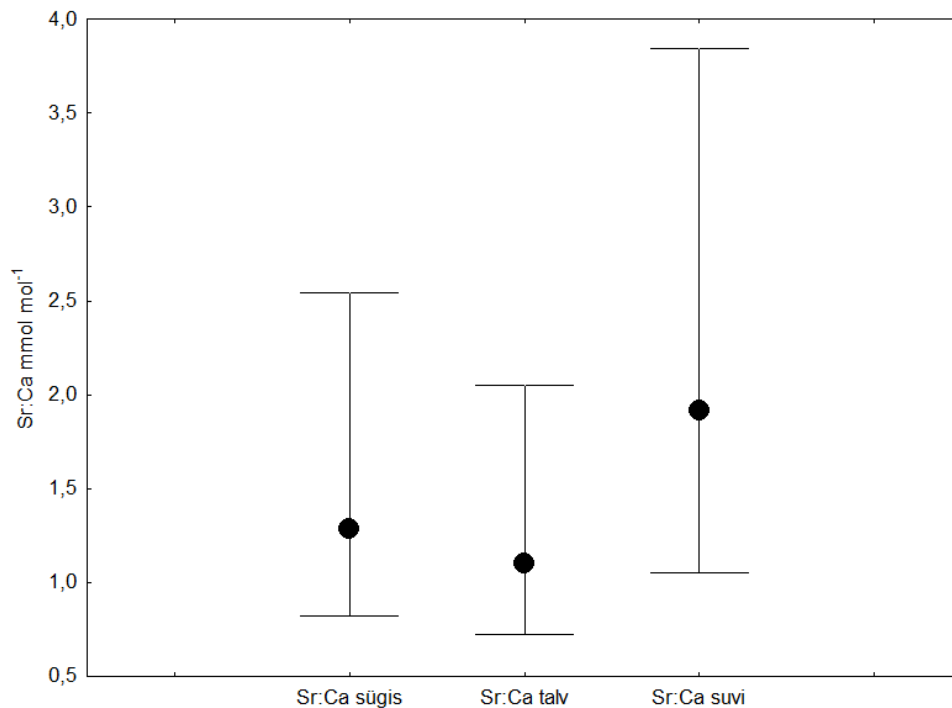
PC1 laadisid negatiivselt kõige rohkem Y, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, La, Ce, Er, Yb, Tb, Ho, Th, Tm ning Lu (kõigil PC laadungid $<-0,2$). Otoliidi mikrokeemia suhtes olulisematest elementidest laadis PC1 kõige rohkem negatiivselt Fe ning Mn. Kõige rohkem laadis PC1 positiivselt Mg, Ca, U, Sr, Li, Na ning Ba. Kõige rohkem negatiivselt laadivate elementide hulgas olid kõik peale Y ning Th lantanoidid. Positiivselt laadivate elementide hulgas on enamiks leelismuldmetalle ning leelismetalle. Jõgedest omasid kõige negatiivsemat skoori Keibu jõgi, Nuutri jõgi, Angla oja, Vainupea oja ning Punapea jõgi. Kõige positiivsema skooriga olid Toolse jõgi (kõik kolm proovipunkti), Lige oja ning Selja jõe Arkna punkt.

PC2 oli negatiivselt laetud kõige rohkem Li, Sr, K ja Rb poolt (kõigi laadung $<-0,3$). Veel laadis PC2 negatiivselt U, Mg, Ba, Na ja Ca. Positiivselt laadis PC2 Zn, Fe ja Cr. Veeproovi punktidest oli kõige negatiivsema skooriga Pühajõe kaks punkti, Võlupe jõgi, Leisi ja Ristoja. Kõige positiivsema skooriga olid Höbringi oja, Nõva jõe Kasesirge punkt, Tuhala jõgi, Veschioja ja Vanajõgi.

PC3 oli negatiivselt laetud kõige rohkem Zn, Cu, Ca, Cd, U ja Cr, positiivselt aga kõige rohkem Rb, K, Fe, Na, Mn ja Li poolt. Kõige negatiivsema skooriga olid Valgejõe Loksa punkt, Soonda oja, Jämaja oja, Leisi jõgi ja Männiku oja. Kõige positiivsema skooriga olid PC3 põhjal Pühajõe kaks punkti, Nõva jõe Kasesirge punkt, Veski oja ja Keibu peakraav.

Otoliitidelt mõõdetud $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhte panust jõgede eristamisse hinnati samuti peakomponentanalüüsiga. Peakomponentanalüüsi abil teostati kaks testi, esimene ilma $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$, teine koos $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ väärtusega. Esimeses testis ilma Sr isotoopideta seletasid kaks esimest peakomponenti ära 72,3% hajuvusest. PC1 oli kõige rohkem laetud Th, Lu, Yb, Tm, Er, Ho, Dy, Tb, Gd, Eu, Sm, Nd, Pr, Ce, La, Cd, Y, Mn, Fe poolt (laadungid $<-0,7$). PC2 oli kõige rohkem laetud Sr, Rb, Li ning K poolt (laadungid $>0,8$). Teine test koos $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ ilmnis samasugune tulemus, kuid $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhe hakkas oluliselt laadima alles neljandat peakomponenti (laadung $>0,7$).

Kolme aastaaja (sügis, talv, suvi) veeproovide peakomponentide omavahelises võrdluses mitteparameetrilise testiga ei ilmnunud olulist sarnasust. Sügise, talve ning suve proovide PC1, PC2, PC3 ega PC4 ei olnud erinevad (Friedman ANOVA, vastavalt $p=0,889$; $p=0,068$; $p=0,401$; $p=0,703$). Element:Ca suhte eraldi võrdlus näitas aga pisut teist tulemust. Nii Sr:Ca, Ba:Ca, Mg:Ca, Mn:Ca kui ka Rb:Ca suhted olid oluliselt erinevad sügise, talve ja suve proovide vahel (Friedman ANOVA, kõikidel testidel $p<0,01$). Nii Sr:Ca, Mg:Ca, Mn:Ca kui ka Rb:Ca puhul oli suve proovid märgatavalt kõrgemate näitudega kui sügise ning talve proovid (joonis 2.) , millest ilmselt tulenebki oluline erinevus proovide vahel.

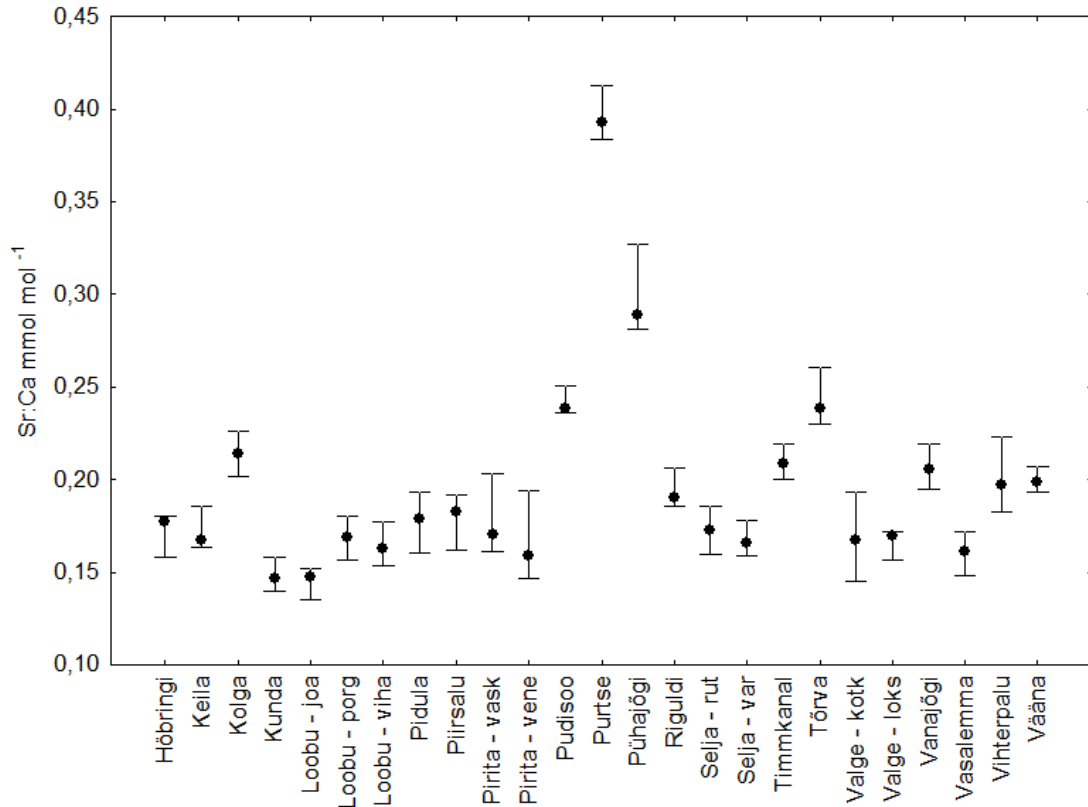


Joonis 2. Sr:Ca suhte varieeruvus sügise, talve ning suve veeproovide vahel (igal aastaajal n=34). Kujutatud on keskmisi (punktiga) ning minimaalsete ja maksimaalsete väärtuste ulatust.

4.2. Otoliidide mikrokeemia tulemused

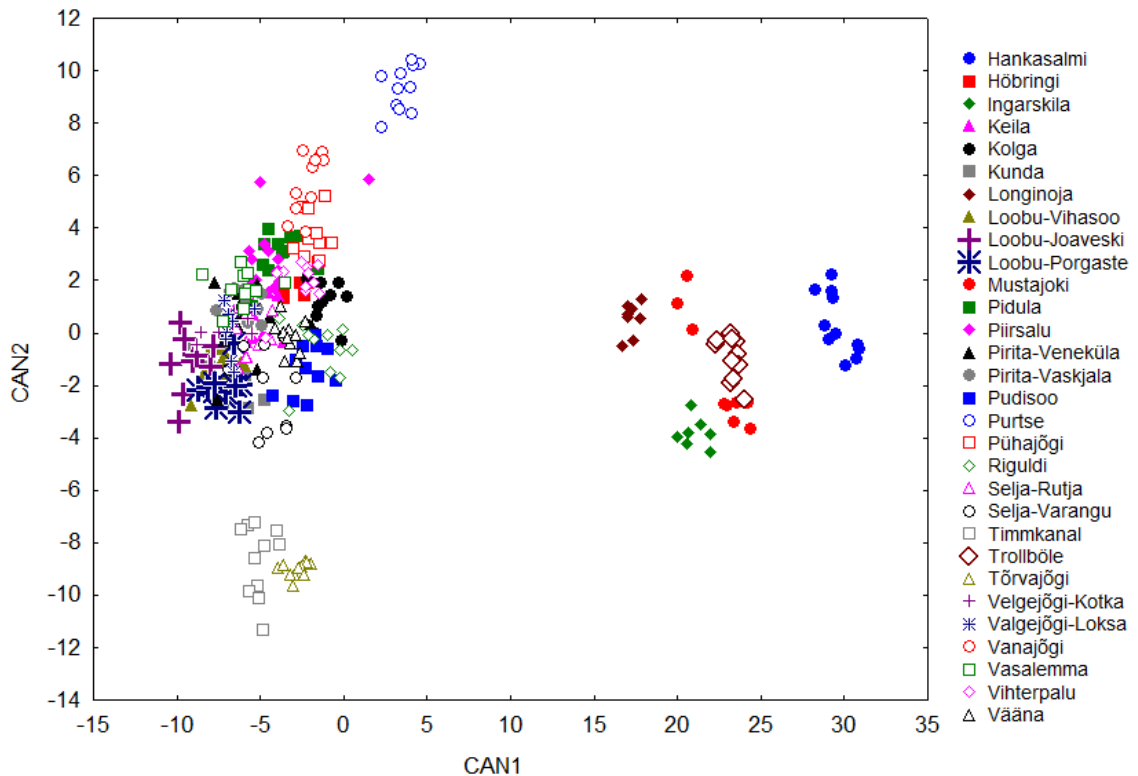
Erinevatest punktidest pärit kalade Sr:Ca, Ba:Ca, Mn:Ca, Mg:Ca, Rb:Ca, Pb:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhted otoliidis olid kõik oluliselt erinevad ning seda ka siis kui analüüsi kaasati ainult Eestist püütud kalade andmed (Kruskal-Wallis, kõikide testide $p < 0,01$) (joonis 3.).

Diskriminantanalüüsist kõikide punktidega (k.a Soome) ilmnes, et erinevatest jõgedest püütud kalade puhul on Wilks' partial λ põhjal eristamiseks kõige olulisem just Sr:Ca suhe ($\lambda = 0,044$), edasi Ba:Ca ($\lambda = 0,079$) ja $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ ($\lambda = 0,087$). Rb:Ca, Mn:Ca, Mg:Ca Pb:Ca suhted panustasid eristamisse kõige vähem.



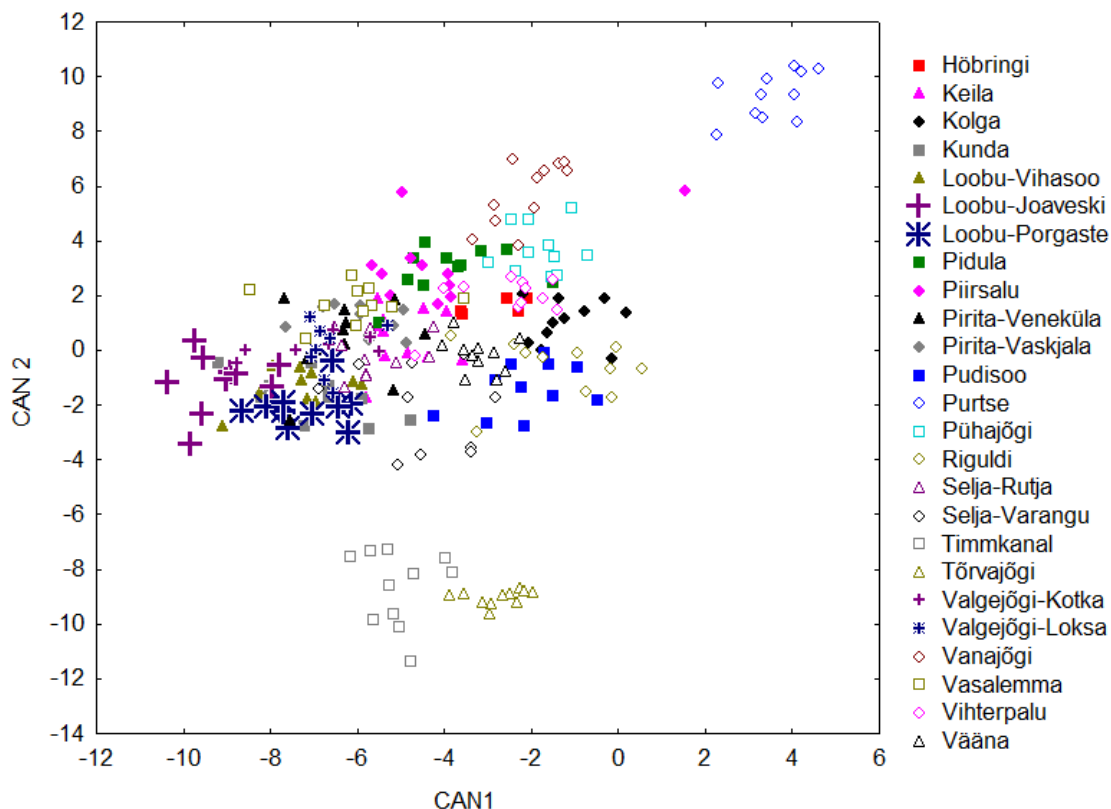
Joonis 3. Erinevatest Eesti vooluveekogudest püütud forellide Sr:Ca suhte erinevus otoliitides. Kujutatud on keskmisi (punktiga) ning maksimaalsete ja minimaalsete väärtuste ulatust.

Kaks esimest kanoonilist funktsiooni (CAN) seletasid ära 92,5 % hajuvusest. Esimest kanoonilist funktsiooni laadisid positiivselt kõige rohkem Sr:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$. Teist kanoonilist funktsiooni laadisid kõige rohkem aga negatiivselt Ba:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ (lisa 4). Kahe esimese kanoonilise funktsiooni skooride põhjal tehtud punktdiagrammil eristusid Eesti kaladest selgelt kõik Soome jõgedest püütud kalad (joonis 4). Lisaks sellele olid ka Soome jõgedest pärit kalad omavahel küllaltki hästi eristunud. Erandiks oli vaid Mustajoki.



Joonis 4. Diskriminatsioonanalüüsi tulemusena saadud kahe esimese kanoonilise funktsiooni (CAN1, CAN2) alusel loodud punktdiagramm. Kujutatud on nii Eesti kui ka Soome kalu.

Esimese kanoonilise funktsiooni põhjal eristuvad kõige paremini just Soome jõgedest püütud kalad (keskmised CANi skoorid >21) Eesti kaladest (keskmised CANi skoorid <0) (lisa 5). Selgesti eristub veel Purtse jõgi, mille keskmine CAN1 väärtus on kõrgem kui ülejäänud Eesti kaladel (3,5 vs <0). Teine kanooniline funktsioon eristas kõige paremini kalu Eesti siseselt. Näiteks eristusid teise kanoonilise funktsiooni alusel hästi Purtse jõgi ja Vanajõgi (CAN 2 keskmine >5) ning Tõrvajõgi ja Timmkanal (CAN 2 keskmine <-8). Need jõed paistsid silma ka kahe esimese CAN skooride põhjal tehtud punktdiagrammi peal, milles oli kasutatud vaid Eesti jõgedest püütud kalu (joonis 5).



Joonis 5. Diskriminantanalüüsi tulemusena saadud kahe esimese kanoonilise funktsiooni alusel loodus punktdiagramm. Kujutatud on ainult Eesti jõgedest pärit kalad.

Tagasiklassifitseerimise edukus oli 37,5 - 100%, keskmiselt 84,8% (lisa 6). 100% klassifitseeriti õigesti kõikidesse Soome jõgedesse, va Mustajoki (66,7%). Kaks kala Mustajokist paigutati Longinojasse ning üks kala Trollbölle punkti, seega läks Mustajoki segamini vaid Soome enda jõgede ning kalakasvatustega. Mustajoki madal tagasiklassifitseerimise tulemus võib olla tingitud asjaolust, et osad Mustajoki kalad olid pärit jõe kõrvalharust. Otoliitide analüüsile eelnevalt ning ka selle ajal ei olnud võimalik neid kalu eristada. See, et kalad olid pärit erinevatest jõeharudest, selgus alles hiljem. Eesti jõgedest oli 100% tagasiklassifitseerimine Höbringi jõkke, Pirita jõe Vaskjala punkti, Pudisoo jõkke, Purtse jõkke, Pühajõe Orupargi punkti, Selja jõe Rutja punkti ning Tõrvajõkke. Kõige madalam tagasiklassifitseerimise edukus oli Valgejõe kahe punkti, Kotka ning Loksa puhul (vastavalt 42,9%, 39,5%). Valgejõe Kotka punkti puhul paigutati seitsmest kalast õigesti vaid kolm, kolm tükki klassifitseeriti Valgejõe Loksa punkti ning üks kala Pirita jõe Veneküla punkti. Valgejõe Loksa puhul paigutati kaheksast kalast õigesti samuti vaid kolm. Üks kala klassifitseeriti Valgejõe Kotka punkti, üks Kunda jõkke, üks Loobu jõe Vihasoo punkti, üks Pirita jõe Veneküla punkti

ning üks kala Vasalemma jõkke. Eesti jõgedest oli madal tagasiklassifitseerimine veel Pirita jõe Veneküla punktil (45,5%) ning Keila jõe puhul (54,5%). Keila puhul klassifitseeriti 11 kalast õigesti vaid kuus. Pirita-Veneküla puhul 10 kalast viis.

5. Arutelu

Otoliidi elemendilist sõrmejälge saab kasutada erinevateks ihtüoloogilisteks uuringuteks. Sõrmejälje kasutamise eelduseks on aga kindlasti see, et erinevatest elupaikadest pärit kalad omavad elukohaspetsiifilist otoliidi mikrokeemiat. Kui see eeldus on täidetud, siis on võimalik sõrmejälje meetodit kasutada näiteks kalade eristamiseks erinevates veekogudes (Dou *et al.*, 2012; Martin *et al.*, 2013). Eelnevalt aga peab kindlaks tegema selle, kas erinevad veekogud (nt jõed) omavad erinevat vee keemiat ning kas see varieeruvus peegeldub ka otoliitides (Martin *et al.*, 2013; Olley *et al.*, 2011).

Käesoleva töö üheks eesmärgiks oli kindlaks teha erinevate Eesti jõgede veekeemia varieeruvus. Veeproove koguti ühekordselt 81 erinevast punktist üle Eesti, et teha kindlaks veekeemia ruumiline varieeruvus ning täiendavalt veel kahel korral 35 punktist, et uurida ajalist varieeruvust. Selgus, et Eesti jõed on ruumis küllaltki varieeruva veekeemiaga. Kõige olulisemad elemendid vooluveekogude eristamises olid mitmesugused lantanoidid (nt Y, Pr, Nd, Sm jne), leelismuldmetallid ja leelismetallid. Esimesed ei ole otoliidi mikrokeemia seisukohalt väga olulised, sest nende elementide kvantifitseerimine otoliidist pole veel tehniliselt võimalik. Leelismuldmetallid ja leelismetallid nagu Mg, Ca, Li, Sr, Na ning Ba on aga erinevate uuringute teostamisel kasutusel. Mg sisaldus vees ei ole oluliselt mõjutatud antropogeensetest teguritest (Nikanorov & Brazhnikova 2009) ning peaks selle tõttu olema küllaltki stabiilne. Samas on Mg puhul leitud, et see element ei ole otoliidis väga stabiilne ja püsiv (Veinott *et al.*, 2014). Na sisaldus vees on jällegi mõjutatud erinevatest antropogeensetest teguritest (Nikanorov & Brazhnikova 2009) ning seega on võimalus, et see element varieerub ajas tugevasti. Üldiselt loetakse otoliitide seisukohalt kõige olulisemaks just Ba ja Sr, sest need elemendid jõuavad otoliiti samades kogustes nagu neid leidub vees (Bath *et al.*, 2000; Collingsworth *et al.*, 2010; Martin *et al.*, 2013). Samuti on näiteks mõlemad oluliselt mõjutatud aluspõhja koostisest. Selle tõttu võiks olla just Sr ning Ba need elemendid, mille alusel saaks ka Eesti jõgedest püütud kalu eristada.

Küllaltki lähestikku asuvad jõed omavad tihti samasugust keemiat, nagu Höbringi ja Nõva, Võlupe ja Leisi ning Kuusalu oja ja Valgejõgi. Samas paiknesid ka väga kõrge ning väga madala Sr sisaldusega jõed küllaltki lähestikku. Näiteks Saaremaal asuvad nii

väga kõrge Sr sisaldusega Võlupe jõgi kui ka Leisi jõgi, samas on seal ka väga madala Sr sisaldusega Vesikioja ning Vesiku oja. See annab lootust, et vähemalt Sr sisalduse põhjal oleks võimalik kalu eristada ka küllaltki lähedal asuvatest jõgedest. Kuigi Mg ei pruugi otoliidis olla väga stabiilne, võiks seda elementi kasutada, kui on vaja muuta sõrmejälge veelgi spetsiifilisemaks, sest samamoodi nagu Sr puhul, asusid ka kõrge ning madala Mg sisaldusega jõed küllaltki lähestikku. Näiteks eelnevas näites olnud madala Sr sisaldusega Vesiku oja ja Vesikioja, omasid Mg sisalduses aga suurt erinevust.

Jõgede eristamiseks oli üheks kõige olulisemaks elemendiks Sr. Selline tulemus on ilmnunud ka varasemates uuringutes mujal maailmas (Olley *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2013). Seda ilmselt selle tõttu, et Sr sisaldust vees mõjutavad tugevalt aluspõhja kivimid ning on leitud, et Sr sisaldus vees sõltub kivimite vanusest (Löfvendahl *et al.*, 1990). Kuna on leitud, et $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ jõuab otoliitidesse samas koguses, mis neid leidub vees (Kennedy 2002; Martin *et al.*, 2013), kasutati antud töös otoliitidelt mõõdetud $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ koos veest mõõdetud elementidega, et leida, kas ka $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ on oluline jõgede eristamisel. Tulemustest ei ilmnunud $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ olulisus jõgede eristamisel. Selle taga võib olla otoliitide analüüsimisel tehtud viga, mis avastati kahjuks alles andmetöötluse käigus. Nimelt kasutati otoliitide $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ analüüsimiseks liiga madalat sagedust (10 Hz) - parameeter, mis mõjutab mõõdetava keemilise signaali tugevust. See sagedus oli piisav Soome kalade otoliitide analüüsiks, kuid mitte Eesti omade jaoks. Eesti jõgedes ei ole Sr sisaldus nii kõrge kui Soome jõgedes (aluspõhja suured erinevused) ning selle tõttu ei saadud ka Eesti kalade puhul täiesti usaldusväärset ja müravaba näitu. Kui Eesti kalade puhul oleks Sr isotoopide analüüsimiseks kasutatud kõrgemat sagedust (nt 15 Hz), oleksid näidud tulnud täpsemad ja tõenäoliselt oleks sel juhul Sr isotoobid osutunud ka olulisemaks jõgede eristamisel.

Veekeemia varieeruvus aastate vahel või aastasiseselt võib mõjutada ka otoliidi mikrokeemiat selliselt, et ei teki stabiilset näitu. See tähendab seda, et ka otoliidi siseselt võib mikrokeemia olla väga varieeruv. Selle tõttu on sõrmejälje meetodi kasutamise üheks oluliseks eelduseks veekeemia stabiilsus ajas (Campana 2000). Selles töös ei ilmnunud Eesti jõgede kolme veeproovi (sügis, talv, suvi) peakomponentide võrdluses erinevusi. Oluline erinevus ilmnes aga element:Ca võrdlustes. Nii Sr:Ca, Ba:Ca, Mg:Ca, Mn:Ca, Rb:Ca kui ka Pb:Ca olid oluliselt erinevad kolmes veeproovis. Lisaks sellele ilmnes mitme elemendi puhul ka tunduvalt kõrgem kontsentratsioon suvel. See aga ei

pruugi otoliidi sõrmejälje kasutamisel tekitada väga suuri probleemi. Martini jt. (2013) töös ilmnes samuti Sr:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhte mõningane aastaajaline varieeruvus. Martini töös korreleerus see varieeruvus küllaltki hästi vooluhulgaga. Sr:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ väärtused oli suvekuudel ning madala vooluhulga korral kõrgemad. On leitud, et suvel ning madala vooluhulga korral jõuab jõgedesse kõige rohkem vett põhjaveest ning madalamatest mullakihtidest, kus murenemine on intensiivsem ning selle tõttu ka vee mineraalainete sisaldus kõrgem (Jarvie *et al.*, 2000). Kuigi käesolevas töös ei uuritud element:Ca suhte korrelatsiooni vooluhulgaga, võib oletada, et vooluhulga muutus võib ka siin olla mõningase varieeruvuse põhjustaja. Üldiselt on kõrged vooluhulgad ning sellest tulenev varieeruv veekeemia küllaltki lühiajaline ning ei pruugi jätta otoliidile märgatavat jälge (Martin *et al.*, 2013).

Otoliitide kohaspetsiifilist mikrokeemiat võib lugeda sõrmejälje kasutamise aluseks. Antud töös analüüsiti erinevatest punktidest püütud 0+ kalu ehk sama aasta kevadel koorunud meriforelle. Otoliitidelt mõõdetud elementidest kasutati kalade eristamiseks Mn:Ca, Rb:Ca, Sr:Ca, Ba:Ca, Pb:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhteid. Algse andmetöötluse faasis oli sees ka Zn, kuid kuna Zn sisaldus otoliidis võib olla mõjutatud nii toidust kui ka füsioloogiast (Bury *et al.*, 2003; Ranaldi & Gagnon 2008), jäeti see element edasisest andmeanalüüsist välja. Sr:Ca, Ba:Ca, Mn:Ca, Mg:Ca, Rb:Ca, Pb:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhted erinevast jõest püütud kalade (gruppide) vahel olid oluliselt erinevad. Selgelt eristusid Soome kalad Eesti kaladest, oluliselt kõrgemate $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ ning Sr:Ca suhete alusel. Soomes puuduvad karbonaatsed kivimid ning muud aluselised sette kivimid, mis omavad üldiselt madalamat $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ sisaldust kui happelised tardkivimid (Löfvendahl *et al.*, 1990). Selle tõttu on Soome jõgede veekeemias kujunenud Sr sisaldus tunduvalt kõrgemaks võrreldes Eesti jõgedega. See loob aga väga head eeldused Soomest ja Eestist pärit kalade eristamiseks, sest liigid, nagu meriforell, merisiig ja lõhe sooritavad regulaarseid kude- ja toitumisrändeid üle Soome lahe.

Eesti-siseselt olid kõige kõrgemate Sr:Ca sisaldusega kalad Purtse jões, Pühajões ning Tõrvajões. Kõik need jõed jäävad Ida-Eestisse. Võiks oletada, et sealne geoloogia kujundabki jõgedele kõrge Sr:Ca sisalduse. Samas on Purtse jõe väga lähedal asuval Kunda jõel üks madalamaid Sr:Ca väärtusi (vastavalt 0,393 ja 0,150). Purtse jõgi, Pühajõgi ning Tõrvajõgi on kõik ümbritsetud erinevate põlevkivi kaevanduste ning -tööstustega. Uuringutes Ida-Eesti jõgedel on leitud, et kaevandused võivad tõsta jõevee

Sr sisaldust looduslikust tasemest kõrgemale (Szava-Kovats 2001). Seega, kuigi aluspõhi on põhiline Sr sisalduse määraja jõevees, kinnitab antud töö ka võimalust, et antropogeensed mõjud võivad mõningal määral jõevees Sr sisaldust tõsta. Üks võimalus on ka mere mõju. Vastavast suunast tuultega võib merevesi üsna kaugele jõkke tungida. Merele väga lähedased punktid (nagu Purtse jõe punkt) võivad seega olla üsna tihti ka merevee mõju all, mis võib kujundada otoliitidele kõrgema Sr:Ca suhte.

Sr:Ca suhe tuli statistiliselt kõige olulisemaks kalade ning jõgede eristajaks ka diskriminantanalüüsi põhjal. Sr:Ca suhe, millele järgnes Ba:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$, olid olulisemad kalade eristamiseks. Rb:Ca, Mg:Ca, Mn:Ca ning Pb:Ca panustasid eristamisse kõige vähem. Mg ning Mn puhul on varem leitud, et need elemendid võivad otoliidis olla ebastabiilsed ning aja möödudes kristallmaatriksist välja liikuda (Veinott *et al.*, 2014). Eriti paistab ebastabiilsusega silma Mg. Ka antud töös varieerusid nii Mg kui ka Mn kala elu jooksul väga palju ning otoliitidelt mõõdetud Mg:Ca kui Mn:Ca profiilil ei ilmnunud nii selget varieeruvuse trendi kala elu jooksul, nagu on näiteks Sr puhul. Sr sisaldus oli otoliitides alati kõige kõrgem tuuma osas (lisa 7) ning langes seejärel magevee tasemele, püsid seejärel küllaltki stabiilselt ühel tasemel, sest magedas vees on Sr sisaldus aasta jooksul küllaltki stabiilne. Kõrge Sr sisaldus tuumas näitab konkreetsel isendil anadroomse ema mõju. Mg ja Mn varieeruvuse üks võimalik seletus võib olla see, et need elemendid on füsioloogilise kontrolli all ning selle tõttu varieerub nende sisaldus otoliitides palju (Martin & Thorrold 2005).

Diskriminantanalüüsi alusel eristusid väga hästi Soome ja Eesti kalad. Seda peamiselt tänu Sr:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhtele, mis on Soome jõgedes tunduvalt kõrgemad. Keskmiselt on tagasiklassifitseerimise edukus 84,4%, mis on väga hea tulemus võrreldes mujal maailmas teostatud sarnaste uuringute edukusega (Gahagan *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2013). Kõikide Soome jõgede, peale Mustajoki, tagasiklassifitseerimine oli 100%. Mustajoki läks segamini omakorda vaid teiste Soome punktidega. Mustajoki madalama tagasiklassifitseerimise edukuse põhjus oli see, et osad analüüsis olnud kalad olid kogutud Mustajoki kõrvalharust (mis peegeldus ka osade kalade erinevas otoliitide keemilises koostises). Kuna aga Soome kolleegid panid kõik selle jõe vesikonna kalad ühte kotti ja andsid sellest teada alles hiljuti, siis polnud neid kalu enam hiljem võimalik

eristada. Seetõttu on tõenäoline, et kõrvalharust pärit kalad suurendasid selle jõe sõrmejälje varieeruvust ja tingisidki mõningase ebatäpsuse tagasiklassifitseerimisel.

Eesti kaladest oli tagasiklassifitseerimise edukus 100% peamiselt jõgedes, mis paistsid samuti silma eelkõige kõrge Sr:Ca suhte poolest, nagu Purtse jõe, Pudisoo jõe, Pühajõe ning Tõrvajõe kalad. Kalade grupid, mille tagasiklassifitseerimise edukus jäi alla 100%, läksid segamini peamiselt väga lähedal asuvate jõgedega või siis jõgedega, mis omasid mingil moel sarnast geoloogiat. Kolga oja tagasiklassifitseerimine oli küllaltki kõrge (90,9%). Üks kala aga paigutati näiteks Vihterpalu jõkke. Simmi (1975) järgi kuulub Vihterpalu jõgi Pärnu jõe allrajooni, kuna võrreldes ülejäänud Loode-Eesti jõgedega mõjutavad Vihterpalu jõge sarnaselt Pärnu ümbruses asuvate jõgedega oluliselt erinevad soomassiivid. Selle tõttu on oodatav, et Vihterpalu jõel ning Kolga ojal, mis asub Pärnumaal, on sarnane veekeemia. Vasalemma jõe kaladel oli samuti kõrge tagasiklassifitseerimise edukus (81,8%). Üks kala aga paigutati valesti Vääna jõkke, mis asub Vasalemma jõele väga lähedal. Ka Vääna jõe kaladel oli üldiselt väga kõrge tagasiklassifitseerimise edukus (90,9%), kuid samuti paigutati üks kala valesti lähedal asuvasse Keila jõkke.

Valgejõe kaks punkti olid küllaltki madala tagasiklassifitseerimise edukusega, seda selle tõttu, et ühe punkti kalu paigutati valesti teise punkti ja vastupidi. Ka Loobu jõe kolm punkti läksid segamini peamiselt omavahel. Igas punktis paigutati vähemalt üks kala mõnda teise Loobu jõe punkti. Sama toimus ka Selja jõe proovivõtu kohtadega, kuigi ühe tagasiklassifitseerimise edukus oli 100%, paigutati teises punktis valesti kaks kala. Sellest võib oletada, et ühe jõe siseselt ei pruugi olla erinevate jõelõikude Sr:Ca ja Sr isotoopide põhjal kalade eristamine võimalik. Samas võib ka siin jällegi mõju avaldada isotoopide analüüsimisel kasutatud masina madal tundlikkus. Olulisem ongi, et kalu oleks võimalik eristada jõgedevaheliselt, mitte niivõrd jõgedesiseselt. Kuigi Loobu kolmes punktis paigutati üksikud kalad valesti teistesse sama jõe punktidesse, oli ikkagi tagasiklassifitseerimise edukus suhteliselt kõrge (keskmiselt 83,3%). Selja jõel oli samuti tagasiklassifitseerimise edukus küllaltki kõrge (keskmiselt 90%). Valgejõe madal tagasiklassifitseerimine võib olla põhjustatud kalade liikumisest. Näiteks heeringaliste puhul on leitud, et noored kalad võivad enne merre laskumist küllaltki palju magevees liikuda (Gahagan *et al.*, 2012). Kuigi lõheliste noorjärgud on küllaltki paiksed ja

territoriaalsed (Rannak *et al.*, 1983), siis ei saa siin välistada ka võimalust, et noored kalad võivad pärit olla mõnest teisest jõe punktist või lisajõest (nt liikunud sünnipaiga kõrge asustustiheduse tõttu).

Antud töös veeproovide ja kalade vahelist võrdlust ei tehtud, kuid mõningatest tulemustest võib järeldada, et ka Eestis võiks kalade mikrokeemia ning jõgede vee keemia olla omavahel küllakti hästi seotud. Kui võrreldi omavahel jõgesid, millest on olemas ka otoliidi proov, ilmnes, et Sr:Ca suhe, mis oli nii jõgede kui ka kalade eristamiseks kõige olulisem, paistab olevat kõige kõrgem just Purtse jõest, Pühajõest, Pudisoo jõest, Kolga ojast ning Keila jõest püütud kaladel. Veeproovides on kõige kõrgem Sr:Ca väärtus Pühajõel, Purtse, Vääna, Keila jõel ning Kolga ojal. Kõige väiksem Sr:Ca väärtus oli Kunda, Vasalemma, Valgejõe Kotka ja Loksa ning Selja jõe Rutja punktidest püütud kaladel. Veeproovidest oli madalaim Sr:Ca sisaldus Valgejõe mõlemal punktil, Kunda, Vasalemma ning Vanajõel. Seega on nii Sr:Ca kõrgeid kui ka madalaid väärtusi vaadates küllaltki suur sarnasus otoliidi mikrokeemia ning vee keemia vahel. Kõige kõrgem keskmine Ba:Ca sisaldus oli näiteks Vääna jões, Pühajões, Kunda, Pudisoo ning Selja jões. Kaladest omas kõige kõrgemat Ba:Ca väärtust Keila, Pudisoo, Kunda ning Valgejõe kalad. Seega on sarnasusi ka Ba:Ca suhte vahel, küll mitte nii suuri kui Sr puhul.

Antud töö tulemustest võib järeldada, et Eesti jõed omavad küllaltki varieeruvat veekeemiat ning see erinevus peegeldub ka kalade otoliitidel. Samasuviste kalade otoliidi mikrokeemia alusel tehtud tagasiklassifitseerimine tõestas, et ka Eesti jõgedes oleks võimalik täiskasvanud kalu oma sünnijõe tagasi määrata. Üldine tagasiklassifitseerimise edukus oli väga kõrge ning valesti paigutati kalu peamiselt just väga lähedal asuvatesse jõgedesse või siis sama jõe teise punkti. Edasi peaks testimise veekeemia ning samast jõest pärit kalade otoliidi mikrokeemia korrelatsiooni ning looma erinevate jõgede keemilise sõrmejälje andmebaasi. Seejärel oleks võimalik välja selgitada merest püütud või siis jõkke kudema tulnud täiskasvanud kalade päritolu, kasutades käesoleva töö andmeid ja tagasiklassifitseerimise reegleid. Selliselt on võimalik leida täiendi mõttes kõige tootlikumad meriforelli kudejõed ning vajadusel need täiendavalt kaitse alla võtta. Samas oleks võimalik uurida edasi ka neid jõgesid, kus on küll näiteks noorjärke, kuid täiskasvanuna neid saagis ei esine. Teades seda, on

juba võimalik edasi uurida neid põhjusi, miks selle konkreetse jõe noorjärgud täiskasvanuikka ei jõua (toidupuudus, haigused, varjevõimaluste vähesus jne).

Käesolev töö on unikaalne oma mastaapsuse poolest. Kui muidu on sõrmejälje meetodit rakendades keskendutud vaid ühele jõesüsteemile või mõnedele lähestikku asuvatele jõgedele, on antud töös käsitletud peaaegu kogu Eesti rannik (kokku üle 60 jõe). Mujal maailmas pole otoliitide sõrmejälje meetodit forellide päritolu väljaselgitamiseks veel väga laialdaselt kasutatud ning leidub vaid mõni üksik uuring (Olley *et al.*, 2011; Veinott *et al.*, 2012). Läänemere piirkonnas on sõrmejälje meetodi abil üritatud erinevast jõest pärit kalu eristada vaid kahes töös (Engstedt *et al.*, 2013; Rohtla *et al.*, 2014 ilmumas). Mõlemad tööd on seotud aga haugiga. Siiani puuduvad tööd meriforellide samasisuliste uuringute kohta Läänemeres. Kuigi forelli noorjarkude asustustiheduse seiret viiakse meriforelli kudejõgedes läbi regulaarselt, ei võimalda need andmed usaldusväärselt hinnata täiendi suurust. Antud tööd edasi arendades oleks võimalik seda aga tulevikus kindlasti teha. Kuna väga selgelt ilmnes erinevus ka Eesti ning Soome kalade vahel, ilmestab see tulemus seda, et sõrmejälje meetodit on võimalik kasutada rahvusvaheliselt ehk erinevatest riikidest pärit kalade eristamisel (sh asustusmaterjali tootvad kalakasvandused). Soome ja Eesti puhul saaks välja selgitada, kui palju mõlema riigi kalad segunevad ning kas ka Soome kalad käivad meie jõgedes kudemas või vastupidi. Kõik need küsimused oleksid olulised selle rahvusvaheliselt tähtsa, kuid ohustatud kalaliigi edukal majandamisel ning turgutamisel.

6. Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli välja selgitada, kas Eestis oleks võimalik otoliidi elemendilise sõrmejälje abil eristada erinevate jõgede kalu. Sellele küsimusele vastamiseks oli eelnevalt vaja teha kindlaks, kas erinevad Eesti jõed võiksid erineda oma veekeemia poolest. Kuna otoliidi elemendiline sõrmejalg kujuneb vastavalt kala elukohale, on jõgedevaheline vee- keemia erinevus aluseks kalade eristamisele. Järgmiseks sammuks oli vaja kindlaks teha, kas on võimalik eristada erinevate jõgede kalu ning millised elemendid võiksid selleks olla kõige olulisemad.

Vee keemia varieeruvuse leidmiseks koguti veeproove 2012. aasta sügisel 81 erinevast punktist üle Eesti. Need punktid esindavad meriforellidele kudemiseks sobilikke jõgesid ning ojasid. Lisaks sellele koguti veeproove ka 2013. aasta talvel ning suvel täiendavalt 35 punktist, et uurida ka ajalist varieeruvust. Samaaegselt sügiseste veeproovide kogumistega püüti ka üle Eesti ka 25 punktist meriforellide noorjärke. Noorjärkude abil on võimalik leida igale jõele iseloomulik otoliidi elemendiline sõrmejalg, sest noored meriforellid on veetnud kogu oma elu sünnijões ning nende otoliidid peegeldavad konkreetse jõe veekeemiat. Lisaks sellele kaasati töösse ka kalad kolmest Soome jõest ning kahest Soome kalakasvatusest, et uurida, millisel määral on sõrmejälje meetodit võimalik kasutada ka suuremal ruumilisel skaalal.

Veeproovidest ilmnes, et jõgede eristamiseks on väga olulised erinevad muldmetallid ning leelismuldmetallid nagu, Mg, Ca, Sr, Li, Na, Ba, K, Rb jne. Need elemendid, eelkõige Sr ja Ba, on väga olulised ka otoliitide mikrokeemia uuringutes, kuna nad peegeldavad kõige paremini veekeemiat. Sr sisalduse alusel oleks võimalik eristada lisaks Eesti eri paigus asuvatele jõgedel ka küllaltki lähedal asuvaid jõgesid, sest ka väga lähestikku asuvatel jõgedel oli suur erinevus Sr sisalduses. Kaasates analüüsi veel juurde eisi elemente saaks aga eristamist veelgi paremaks muuta. Selline tulemus annab lootust, et ka meriforelle oleks võimalik eristada küllaltki lähedal asuvatest jõgedest.

Mõningane erinevus ilmnes element:Ca suhetes sügiseste, talviste ning suviste veeproovide vahel. Kindlasti on otoliidi mikrokeemia seisukohalt väga hea, kui veekeemia püsib võimalikult stabiilne, sest see tagab, et otoliitidele kujuneb konkreetse jõe elemendiline sõrmejalg. Kuigi antud töö tulemustest ilmnes suve veeproovides

tunduvalt kõrgem element:Ca näit võrreldes sügise ja talvega, on leitud, et sügise ja talve veeseisundid on küllaltki lühiajalised ning ei pruugi otoliidile olulist jälge jätta.

20 Eesti jõest püütud kalade ning ka Soome jõgedest pärit kalade element:Ca suhted olid oluliselt erinevad. Kalade eristamiseks olid samuti kõige olulisemad just Sr ning Ba, lisaks veel ka $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$. Väga selgesti eristusid Soome kalad Eesti kaladest, seda eelkõige kõrgema Sr:Ca ning $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ suhte alusel. Kalade tagasiklassifitseerimise edukus oli keskmiselt 84,8%. Kõige edukam oli tagasiklassifitseerimine peamiselt just sellistesse jõgedesse, mis paistsid silma oma Sr:Ca suhte poolest – Purtse, Puditsoo, Pühajõgi, Tõrvajõgi. Ka kõikidesse Soome jõgedesse, v.a Mustajoki, oli tagasiklassifitseerimine 100%, mis näitab, et Eesti kalade eristamine Soomest pärit kaladest on küllaltki lihtne. Madala klassifitseerimise korral paigutati kalu valesti peamiselt väga lähedal asuvatesse jõgedesse või siis sama jõe mõnda teise punkti.

Meriforellide noorjarkude klassifitseerimise täpsus on aluseks tulevastele uuringutele. Kuigi antud töös ei hinnatud täiskasvanud kalade tagasiklassifitseerimise edukust, annab käesoleva töö tulemus lootust, et ka täiskasvanud kalade puhul peaks olema võimalik nad tagasi määrata oma sünnijõkke. Eelkõige peaks see olema võimalik Sr:Ca suhte abil. Noorte kalade sõrmejälgi võib lugeda andmebaasiks, mille abil hakatakse täiskasvanud kalu tagasi määrama. Täiskasvanud kalade tagasimääramise abil oleks võimalik tulevikus leida, millised on Eestis kõige paremad meriforellide kudejõed. Sellised jõed oleks edaspidi võimalik võtta täiendava kaitse alla. Samuti oleks võimalik välja selgitada, miks mõned jõed, mis muidu peaksid olema sobilikud meriforellile, ei tooa nii palju uusi kalu kui võiks. Lisaks sellele oleks võimalik leida, kas ja kui suures ulatuses Eesti ja Soome kalad omavahel segunevad. Kõik sellised uurimisküsimused oleksid väga olulised meriforelli majandamisel ning nendele vastuse leidmise abil oleks võimalik turgutada hääbuvaid populatsioone ja kaitsta seda ohustatud kalaliiki.

7. Summary: "Distinguishing juvenile sea trout (*Salmo trutta*) from different natal streams based on otolith elemental fingerprints."

The objective of this study was to examine if it is possible to distinguish *S. trutta* parr from different natal streams in Estonia. In order to answer this, it is important to firstly investigate if different rivers and streams in Estonia differ in terms of water chemistry. The elemental fingerprint of otoliths is closely related to the water chemistry that surrounds the fish and it is therefore the basis for distinguishing fish from different water bodies. Secondly, it was important to investigate if it is possible to distinguish parr from different streams and rivers and find which elements are the most important in discriminating between them.

In order to characterize spatial variability in river water chemistry, water samples were collected in autumn of 2012 from 81 different sites in Estonia (mitmes jões kirjuta siia). Water samples were also collected in winter and summer of 2013 from 35 different sites in order to characterize the temporal variability in water chemistry. Same time with water sample collection in 2012 autumn, juvenile brown trout were collected from 25 different sites (20 rivers). Based on otolith fingerprints of juvenile fish it is possible to determine a characteristic fingerprint for every river and stream since juveniles have spent time only in their natal river and their otoliths reflect the water chemistry of their natal river. In addition to Estonian rivers and fish, fish from three Finnish rivers and two fish hatcheries were also included to this study to investigate the extent to which elemental fingerprints can be used internationally.

Different kind of earth metals and alkline earth metals, like Mg, Ca, Sr, Li, Na, Ba, K and Rb were important in distinguishing different rivers. These elements, especially Sr and Ba, are also very important in terms of otolith microchemistry, since these elements directly reflect water chemistry. Using Sr, it is possible to distinguish rivers that are situated relatively close to each other. Other elements are useful in making discrimination even better. Based on these water chemistry results, it is likely that in addition to rivers from different part of Estonia, sea trout from closely situated rivers and streams can also be distinguished.

Element:Ca ratios from water samples collected in autumn, winter and summer showed some intra-annual variation. Concerning otolith microchemistry, it is preferable if water chemistry stays stable through time. This will ensure that otoliths will acquire an unique and chemically stable signal. In this study, there were higher element:Ca ratios in summer samples compared to autumn and winter. However, other studies have found that the autumn and winter conditions in rivers are quite short-termed and do not leave a significant chemical mark on fish otoliths.

Otolith element:Ca ratios were significantly different among sites in Estonia and also in Finland. Sr:Ca, Ba:Ca and $^{86}\text{Sr}:^{87}\text{Sr}$ were the most useful in distinguishing juvenile fish from different rivers and streams. There was a clear difference between Estonian and Finnish trout, mostly because of Sr:Ca and $^{86}\text{Sr}:^{87}\text{Sr}$ ratios. The mean reclassification accuracy for all fish was 84,4%. The highest reclassification accuracy was in rivers that stood out with their high Sr:Ca ratios (e.g. Purtse, Puidisoo, Pühajõgi and Tõrvajõgi). Mis-reclassified fish were mostly classified to a close by river or to a different site in the same river. Reclassification rates for all Finnish rivers were high (66,7 - 100 %) and no fish was reclassified to Estonian rivers. This means that discriminating between Estonian and Finnish fish is straightforward.

The results of the present study form a basis for future work that investigates the natal origin of sea-caught adults. Although adult fish were not used in this work, the results based on juvenile fish indicate that it could be also quite accurate. Sr:Ca ratio has probably the most discriminatory power. The fingerprints of juvenile sea trout could be used as a baseline database for future classifications of adult fish. By determining the natal origin of adult fish it could be possible to locate the best rivers and streams for spawning. These rivers could then be taken under protection. It could also be possible to find out why some rivers do not produce enough recruits, although they seem to be suitable for sea trout spawning. In addition, it could be possible to find out if and to what extent fish from Estonia and Finland mix. These kind of studies would be very useful in managing sea trout stocks. Answering these questions could help to restore the extirpated populations and also to protect this internationally important species.

Tänuavaldused

Autori eriline tänu kuulub juhendajatele Mehis Rohtlale ja Roland Svirgsdenile väga oluliste nõuannete, näpunäidete, toetuse, soovitude ning abi eest töö koostamisel. Autor soovib tänada veel Kristjan Urtsoni, kes viis läbi veeproovide analüüsid, Jessica Millerit, Adam Kenti ja Andy Ungereri Oregoni Ülikoolist, kes võimaldasid otoliitide mikrokeemilise analüüsi jaoks vajaminevate seadmete kasutamist ning juhendasid analüüside läbiviimisel. Autor tänab Håkan Standbergi Trollbøle kalakasvatusest, Hankasalmi kalakasvatuse töötajaid ja Matti Vaitineni tänu kellele sai käesolevasse töösse kaasata ka Soome vetest püütud kalad. Suured tänud Tiiu Raavile, kelle kaasabil sai töö vormistatud korrektse eesti keelele. Tänud veel Lauri Saksale statistiliste nõuannete eest ning Anett Reilentile, kes abistas välitöödel ja andmete kogumisel.

Kasutatud kirjandus

- Alekseevskiy, N.I. (2009). Properties of Rivers, Streams, Lakes and Wetlands. *Types and Properties of Water*. M. G. Khublaryan, Eolss Publishers Co. Ltd. **Vol. II**.
- Allan, J.D. & Castillo, M.M. (2008). *Stream Ecology*, Springer.
- Andrews, A.H., Barnett, B.K., Allman, R.J., Moyer, R.P. & Trowbridge, H.D. (2013). Great longevity of speckled hind (*Epinephelus drummondhayi*), a deep-water grouper, with novel use of postbomb radiocarbon dating in the Gulf of Mexico. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **70**: 1131-1140.
- Arai, T. (2010). Effect of salinity on strontium:calcium ratios in the otoliths of Sakhalin taimen, *Hucho perryi*. *Fisheries Science* **76**: 451-455.
- Barnes, T.C. & Gillanders, B.M. (2013). Combined effects of extrinsic and intrinsic factors on otolith chemistry: Implications for environmental reconstructions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **70**: 1159-1166.
- Barnett-Johnson, R., Pearson, T. E., Ramos, F.C., Grimes, C.B. & MacFarlane, R.B. (2008). Tracking natal origins of salmon using isotopes, otoliths, and landscape geology. *Limnology and Oceanography* **53**: 1633-1642.
- Bath, G.E., Thorrold, S.R., Jones, C.M., Campana, S.E., McLaren, J.W. & Lam, J.W.H. (2000). Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **64**: 1705-1714.
- Benjamin, J.R., Wetzel, L.A., Martens, K.D., Larsen, K. & Connolly, P.J. (2013). Spatio-temporal variability in movement, age, and growth of mountain whitefish (*Prosopium williamsoni*) in a river network based upon PIT tagging and otolith chemistry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **71**: 131-140.
- Brophy, D., Jeffries, T.E. & Danilowicz, B.S. (2004). Elevated manganese concentrations at the cores of clupeid otoliths: possible environmental, physiological, or structural origins. *Marine Biology* **144**: 779-786.
- Bury, N.R., Walker, P.A. & Glover, C.N. (2003). Nutritive metal uptake in teleost fish. *The Journal of Experimental Biology* **206**: 11-23.
- Campana, S.E. (1983). Feeding periodicity and the production of daily growth increments in otoliths of steelhead trout (*Salmo gairdneri*) and starry flounder (*Platichthys stellatus*). *Canadian Journal of Zoology* **61**: 1591-1597.
- Campana, S.E. (1999). Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms, and applications. *Marine Ecology Progress Series* **188**: 263-297.

- Campana, S.E. (2001). Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. *Journal of Fish Biology* **59**: 197-242.
- Campana, S.E. (2005). Otolith elemental composition as a natural marker of fish stocks. *Stock Identification Methods*. S. X. Cadrin, K. D. Friedland and J. R. Waldman. New York, Academic Press: 227-245.
- Campana, S.E., Chouinard, G.A., Hanson, J.M., Fréchet, A. & Bratney, J. (2000). Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks *Fisheries Research* **46**: 343-357.
- Campana, S.E., Fowler, A.J. & Jones, C.M. (1994). Otolith elemental fingerprinting for stock identification of Atlantic cod (*Gadus morhua*) using laser ablation ICPMS. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* **51**: 1942-1950.
- Campana, S.E. & Neilson, J.D. (1985). Microstructure of fish otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **42**: 1014-1032.
- Campana, S.E. & Thorrold, S.R. (2001). Otoliths, increments and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **58**: 30-38.
- Campana, S.E., Valentin, A., Sévigny, J.-M. & Power, D. (2007). Tracking seasonal migrations of redbfish (*Sebastes* spp.) in and around the Gulf of St. Lawrence using otolith elemental fingerprints. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* **64**: 6-18.
- Cánovas, C.R., Olías, M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M. & Cerón, J.C. (2007). Hydrogeochemical characteristics of the Tinto and Odiel Rivers (SW Spain). Factors controlling metal contents. *Science of the Total Environment* **373**: 363-382.
- Chesney, E.J., McKee, B.M., Blanchard, T. and Chan, L-H. (1998). Chemistry of otoliths from juvenile menhaden *Brevoortia patronus*: evaluating strontium, strontium:calcium and strontium isotope ratios as environmental indicators. *Marine Ecology Progress Series* **171**: 261-273.
- Coffey, M., Dehairs, F., Collette, O., Luther, G., Church, T. & Jickells, T. (1997). The Behaviour of Dissolved Barium in Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **45**: 113-121.
- Collingsworth, P.D., Van Tassell, J.J., Olesik, J.W. & Marschall, E.A. (2010). Effects of temperature and elemental concentration on the chemical composition of juvenile yellow perch (*Perca flavescens*) otoliths. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* **67**: 1187-1196.

- Courter, I.I., Child, D.B., Hobbs, J.A., Garrison, T.M., Glessner, J.J.G. & Duery, S. (2013). Resident rainbow trout produce anadromous offspring in a large interior watershed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **70**: 701-710.
- de Villiers, S. (1999). Seawater strontium and Sr/Ca variability in the Atlantic and Pacific oceans. *Earth and Planetary Science Letters* **171**: 623-634.
- DiMaria, R.A., Miller, J. & Hurst, T.P. (2010). Temperature and growth effects on otolith elemental chemistry of larval Pacific cod, *Gadus macrocephalus*. *Environmental Biology of Fishes* **89**: 453-462.
- Dou, S.Z., Amano, Y., Yu, X., Cao, L., Shirai, K., Otake, T. & Tsukamoto, K. (2012). Elemental signature in otolith nuclei for stock discrimination of anadromous tapertail anchovy (*Coilia nasus*) using laser ablation ICPMS. *Environmental Biology of Fishes* **95**: 431-443.
- Elsdon, T.S. & Gillanders, B.M. (2002). Interactive effects of temperature and salinity on otolith chemistry: challenges for determining environmental histories of fish. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* **59**: 1796-1809.
- Elsdon, T.S. & Gillanders, B.M. (2003). Reconstructing migratory patterns of fish based on environmental influences on otolith chemistry. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **13**: 219-235.
- Elsdon, T.S. & Gillanders, B.M. (2003). Relationship between water and otolith elemental concentrations in juvenile black bream *Acanthopagrus butcheri*. *Marine Ecology Progress Series* **260**: 263-272.
- Elsdon, T.S. & Gillanders, B.M. (2004). Fish otolith chemistry influenced by exposure to multiple environmental variables. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **313**: 269-284.
- Engstedt, O., Engkvist, R. & Larsson, P. (2013). Elemental fingerprinting in otoliths reveals natal homing of anadromous Baltic Sea pike (*Esox lucius* L.). *Ecology of Freshwater Fish*.
- Engstedt, O., Koch-Schmidt, P. & Larsson, P. (2012). Strontium (Sr) uptake from water and food in otoliths of juvenile pike (*Esox lucius* L.). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **418-419**: 69-74.
- Gahagan, B.I., Vokoun, J.C., Whitledge, G.W. & Schultz, E.T. (2012). Evaluation of otolith microchemistry for identifying natal origin of anadromous river herring in connecticut. *Marine and Coastal Fisheries* **4**: 358-372.
- Gallahar, N.K. & Kingsford, M.J. (1996). Factors influencing Sr/Ca ratios in otoliths of *Girella elevata* : an experimental investigation. *Journal of Fish Biology* **48**: 174-186.

- Gibson-Reinemer, D.K., Johnson, B.M., Martinez, P.J., Winkelman, D.L., Koenig, A.E. & Woodhead, J.D. (2009). Elemental signatures in otoliths of hatchery rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): distinctiveness and utility for detecting origins and movement. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* **66**: 513-524.
- Hoff, G.R. & Fuiman, L.A. (1995). Environmentally induced variation in elemental composition of red drum (*Sciaenops Ocellatus*) otoliths. *Bulletin of Marine Science* **56**: 578-591.
- Jarvie, H.P., Neal, C., Tappin, A.D., Burton, J.D., Hill, L., Neal, M., Harrow, M., Hopkins, R., Watts, C. & Wickham, H. (2000). Riverine inputs of major ions and trace elements to the tidal reaches of the River Tweed, UK. *Science of the Total Environment* **251-252**: 55-81.
- Kalish, J.M. (1989). Otolith microchemistry: validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **132**: 151-178.
- Kalish, J.M. (1990). Use of otolith microchemistry to distinguish the progeny of sympatric anadromous and non-anadromous salmonids. *Fishery Bulletin* **88**: 657-666.
- Kawakami, Y., Mochioka, N., Morishita, K., Tajima, T., Nakagawa, H., Toh, H. & Nakazono, A. (1998). Factors influencing otolith strontium/calcium ratios in *Anguilla japonica* elvers. *Environmental Biology of Fishes* **52**: 299-303.
- Kennedy, B.P., Blum, J.D., Folt, C.L. & Nislow, K.H. (2000). Using natural strontium isotopic signatures as fish markers: methodology and application. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* **57**: 2280-2292.
- Kennedy, B.P., Klaue, A., Blum, J.D., Folt, C.L. & Nislow, K.H. (2002). Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes in otoliths. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*.
- Ladich, F. & Popper, A. (2004). Parallel Evolution in Fish Hearing Organs. *Evolution of the Vertebrate Auditory System*. G. Manley, R. Fay and A. Popper, Springer New York. **22**: 95-127.
- Limburg, K.E. (1995). Otolith strontium traces environmental history of subyearling American shad *Alosa sapidissima*. *Marine Ecology Progress Series* **119**: 25-35.
- Limburg, K.E., Landergren, P., Westin, L., Elfman, M. & Kristiansson, P. (2001). Flexible modes of anadromy in Baltic sea trout: making the most of marginal spawning streams. *Journal of Fish Biology* **59**: 682-695.
- Löfvendahl, R., Åberg, G. & Hamilton, P.J. (1990). Strontium in rivers of the Baltic Basin. *Aquatic Sciences* **52**: 315-329.

- Macdonald, J.I. & Crook, D.A. (2010). Variability in Sr:Ca and Ba:Ca ratios in water and fish otoliths across an estuarine salinity gradient. *Marine Ecology Progress Series* **413**: 147-161.
- Martin, G.B. & Thorrold, S.R. (2005). Temperature and salinity effects on magnesium, manganese, and barium incorporation in otoliths of larval and early juvenile spot *Leiostomus xanthurus*. *Marine Ecology Progress Series* **293**: 223-232.
- Martin, G.B., Thorrold, S.R. & Jones, C.M. (2004). Temperature and salinity effects on strontium incorporation in otoliths of larval spot (*Leiostomus xanthurus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **61**: 34-42.
- Martin, J., Bareille, G., Berail, S., Pecheyran, C., Daverat, F., Bru, N., Tabouret, H. & Donard, O. (2013). Spatial and temporal variations in otolith chemistry and relationships with water chemistry: A useful tool to distinguish Atlantic salmon *Salmo salar* parr from different natal streams. *Journal of Fish Biology* **82**: 1556-1581.
- McGarigal, K., Cushman, S. & Stafford, S. (2000). Multivariate Statistics for Wildlife and Ecology Research, Springer.
- Melancon, S., Fryer, B.J., Gagnon, J.E. & Ludsins, S.A. (2008). Mineralogical approaches to the study of biomineralization in fish otoliths. *Mineral Mag* **72**: 627-637.
- Mercier, L., Mouillot, D., Bruguier, O., Vigliola, L. & Darnaude, A.M. (2012). Multi-element otolith fingerprints unravel sea-lagoon lifetime migrations of gilthead sea bream *Sparus aurata*. *Marine Ecology Progress Series* **444**: 175-194.
- Mikelsaar, N. (1984). Eesti NSV kalad. Tallinn, Valgus.
- Miller, J.A. (2009). The effects of temperature and water concentration on the otolith incorporation of barium and manganese in black rockfish *Sebastes melanops*. *Journal of Fish Biology* **75**: 39-60.
- Miller, J.A. (2011). Effects of water temperature and barium concentration on otolith composition along a salinity gradient: Implications for migratory reconstructions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **405**: 42-52.
- Mills, J.S., Dunham, J.B., Reeves, G.H., McMillan, J.R., Zimmerman, C.E. & Jordan, C.E. (2012). Variability in expression of anadromy by female *Oncorhynchus mykiss* within a river network. *Environmental Biology of Fishes* **93**: 505-517.
- Milner, N.J., Elliott, J.M., Armstrong, J.D., Gardiner, R., Welton, J.S. & Ladle, M. (2003). The natural control of salmon and trout populations in streams. *Fisheries Research* **62**: 111-125.

- Mohan, J.A., Rulifson, R.A., Reide Corbett, D. & Halden, N.M. (2012). Validation of oligohaline elemental otolith signatures of striped bass by use of in Situ caging experiments and water chemistry. *Marine and Coastal Fisheries* **4**: 57-70.
- Munro, A.R., Gillanders, B.M., Thurstan, S., Crook, D.A. & Sanger, A.C. (2009). Transgenerational marking of freshwater fishes with enriched stable isotopes: a tool for fisheries management and research. *Journal of Fish Biology* **75**: 668-684.
- Nikanorov, A.M. & Brazhnikova, L.V. (2009). Water Chemical Composition of Rivers, Lakes and Wetlands. *Types and Properties of Water*. M. G. Khublaryan, Eolss Publishers Co. Ltd. . **Vol II**.
- Olley, R., Young, R.G., Closs, G.P., Kristensen, E.A., Bickel, T.O., Deans, N.A., Davey, L.N. & Eggins, S.M. (2011). Recruitment sources of brown trout identified by otolith trace element signatures. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **45**: 395-411.
- Olsen, R.L., Chappell, R.W. & Loftis, J.C. (2012). Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis - literature review and Illinois River watershed case study. *Water Research* **46**: 3110-3122.
- Olsson, P.-E., Kling, P. & Hogstrand, C. (1998). Mechanisms of heavy metal accumulation and toxicity in fish. *Metal Metabolism in Aquatic Environments*. W. Langston and M. Bebianno, Springer US: 321-350.
- Pannella, G. (1971). Fish otoliths: daily growth layers and periodical patterns. *Science* **173**: 1124-1127.
- Payan, P., Kossmann, H., Watrin, A., Mayer-Gostan, N. & Boeuf, G. (1997). Ionic composition of endolymph in teleosts: origin and importance of endolymph alkalinity. *The Journal of Experimental Biology* **200**: 1905-1912.
- Popper, A.N., Ramcharitar, J. & Campana, S.E. (2005). Why otoliths? Insights from inner ear physiology and fisheries biology. *Marine and Freshwater Research* **56**: 497-504.
- Ranaldi, M.M. & Gagnon, M.M. (2008). Zinc incorporation in the otoliths of juvenile pink snapper (*Pagrus auratus* Forster): The influence of dietary versus waterborne sources. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **360**: 56-62.
- Rannak, L., Arman, J. & Kangur, M. (1983). Lõhe ja meriforell. Tallinn, Valgu.
- Riley, B.B., Zhu, C., Janetopoulos, C. & Aufderheide, K.J. (1997). A critical period of Ear development controlled by distinct populations of ciliated cells in the zebrafish. *Developmental Biology* **191**: 191-201.

- Rohtla, M., Vetemaa, M., Urtson, K. & Soesoo, A. (2012). Early life migration patterns of Baltic Sea pike *Esox lucius*. *Journal of Fish Biology* **80**: 886-893.
- Rohtla, M., Vetemaa, M., Svirgsden, R., Taal, I., Saks, L., Kesler, M., Verliin, A. & Saat, T. 2014: Using otolith $^{87}\text{Sr}:$ ^{86}Sr as a natal chemical tag in the progeny of anadromous Baltic Sea pike (*Esox lucius*) – a pilot study, *Boreal Env. Res.* **19**. Ilmumas
- Ruttenberg, B.I., Hamilton, S.L., Hickford, M.J.H., Paradis, G.L., Sheehy, M.S., Standish, J.D., Ben-Tzvi, O. & Warner, R.R. (2005). Elevated levels of trace elements in cores of otoliths and their potential for use as natural tags. *Marine Ecology Progress Series* **297**: 273-281.
- Secor, D.H., Henderson-Arzapalo, A. & Piccoli, P.M. (1995). Can otolith microchemistry chart patterns of migration and habitat utilization in anadromous fishes? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **192**: 15-33.
- Simm, H. (1975). Eesti pinnavete hüdrokeemia. Tallinn, Valgus.
- Song, Z., He, C., Fu, Z. & Shen, D. (2008). Otolith thermal marking in larval Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus*. *Environmental Biology of Fishes* **82**: 1-7.
- Szava-Kovats, R.C. (2001). Influence of oil shale mining on strontium distribution in stream sediments, North-East Estonia. *Oil Shale* **18**: 25-33.
- Zimmerman, C.E. (2005). Relationship of otolith strontium-to-calcium ratios and salinity: experimental validation for juvenile salmonids. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* **62**: 88-97.
- Thorrold, S.R., Jones, C.M. & Campana, S.E. (1997). Response of otolith microchemistry to environmental variations experienced by larval and juvenile Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus*). *Limnology and Oceanography* **42**: 102-111.
- Thorrold, S.R., Jones, C.M., Campana, S.E., McLaren, J.W. & Lam, J.W.H. (1998). Trace element signatures in otoliths record natal river of juvenile American shad (*Alosa sapidissima*). *Limnology and Oceanography* **43**: 1826-1835.
- Townsend, D.W., Radtke, R.L., Morrison, M.A. & Folsom, S.D. (1989). Recruitment implications of larval herring overwintering distributions in the Gulf of Maine, inferred using a new otolith technique *Marine Ecology Progress Series* **55**: 1-13.
- Unfer, G. & Pinter, K. (2013). Marking otoliths of brown trout (*Salmo trutta* L.) embryos with alizarin red S. *Journal of Applied Ichthyology* **29**: 470-473.
- Walther, B., Kingsford, M., O'Callaghan, M. & McCulloch, M. (2010). Interactive effects of ontogeny, food ration and temperature on elemental incorporation in otoliths of a coral reef fish. *Environmental Biology of Fishes* **89**: 441-451.

- Walther, B.D. & Thorrold, S.R. (2006). Water, not food, contributes the majority of strontium and barium deposited in the otoliths of a marine fish. *Marine Ecology Progress Series* **311**: 125-130.
- Webb, S.D., Woodcock, S.H. & Gillanders, B.M. (2012). Sources of otolith barium and strontium in estuarine fish and the influence of salinity and temperature. *Marine Ecology Progress Series* **453**: 189-199.
- Veinott, G. & Porter, R. (2005). Using otolith microchemistry to distinguish Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr from different natal streams. **71**: 349.
- Veinott, G., Westley, P.A.H., Purchase, C.F. & Warner, L. (2014). Experimental evidence simultaneously confirms and contests assumptions implicit to otolith microchemistry research. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **71**: 356-365.
- Veinott, G., Westley, P.A.H., Warner, L. & Purchase, C.F. (2012). Assigning origins in a potentially mixed-stock recreational sea trout (*Salmo trutta*) fishery. *Ecology of Freshwater Fish* **21**: 541-551.
- Volk, E.C., Schroder, S.L. & Grimm, J.J. (1999). Otolith thermal marking. *Fisheries Research* **43**: 205-219.
- Woodcock, S.H., Gillanders, B.M., Munro, A.R., McGovern, F., Crook, D.A. & Sanger, A.C. (2011). Using enriched stable isotopes of barium and magnesium to batch mark otoliths of larval golden perch (*Macquaria ambigua*, Richardson). *Ecology of Freshwater Fish* **20**: 157-165.
- Woodcock, S.H., Grieshaber, C.A. & Walther, B.D. (2013). Dietary transfer of enriched stable isotopes to mark otoliths, fin rays, and scales. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **70**: 1-4.
- Voss, B.M., Peucker-Ehrenbrink, B., Eglinton, T.I., Fiske, G., Wang, Z.A., Hoering, K.A., Montluçon, D.B., LeCroy, C., Pal, S., Marsh, S., Gillies, S.L., Janmaat, A., Bennett, M., Downey, B., Fanslau, J., Fraser, H., Macklam-Harron, G., Martinec, M. & Wiebe, B. (2014). Tracing river chemistry in space and time: Dissolved inorganic constituents of the Fraser River, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **124**: 283-308.
- Yidana, S.M., Ophori, D. & Banoeng-Yakubo, B. (2008). A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management* **86**: 80-87.

LISAD

LISA 1. Veeproovide ning meriforellide noorjärkude kogumise punktid. Eraldi on välja toodud proovide kogumise aeg (märgitud x-ga) ning valimi suurus punktides, kus koguti kalu.

Jõgi	Punkt	Koordinaadid	Sügise proov	Talve proov	Suve proov	Kalade arv
Altja		59°34'44.05"N 26° 7'14.70"E	x	x	x	
Angerja o.		59°14'57.17"N 24°52'36.62"E	x			
Angla o.		58°31'20.48"N 22°40'31.39"E	x			
Hankasalmi (Soome kalakasvatus)		62°29'18.78"N 26°46'11.01"E				11
Häädemeeste j.		58° 4'18.24"N 24°29'31.12"E	x			
Höbringi o.		59° 7'46.96"N 23°34'28.30"E	x			5
Ingarskila (Soome)		60°40'38.9"N 24°09'36.6"E				7
Jägala j.		59°27'59.80"N 25° 9'26.00"E	x	x	x	
Jämaja o.		57°59'31.69"N 22° 4'20.97"E	x			
Kaberla o.		59°29'31.15"N 25°15'37.89"E	x			
Kaldamäe o.		59° 7'47.42"N 24° 4'9.81"E	x			
Keibu pkr		59°14'25.66"N 23°46'11.49"E	x	x	x	
Keila j.		59°23'50.57"N 24°17'8.09"E	x	x	x	11
Kiruma pkr		58°29'17.14"N 22°18'17.02"E	x			
Kloostri j.		59°13'47.50"N 24° 8'20.01"E	x	x	x	
Kolga o.		58°23'1.73"N 23°50'35.68"E	x	x	x	11
Kuivajõgi		59°12'14.12"N 25° 5'40.69"E	x			
Kunda j.		59°30'39.01"N 26°32'13.05"E	x	x	x	11
Kuusalu o.		59°28'34.86"N 25°26'2.85"E	x			
Kõrtsioja		59° 5'46.31"N 23°59'44.47"E	x			
Leisi j.		58°34'27.45"N 22°40'16.02"E	x	x	x	
Leivajõgi		59°17'41.78"N 25° 3'36.07"E	x			
Lige o.		58°25'29.97"N 22° 7'11.66"E	x			
Longinoja (Soome)		60°14'21.9"N 24°59'40.1"E				8
Loo j.		59°29'43.22"N 25°27'51.91"E	x			
Loobu j.	Vihasoo	59°33'24.56"N 25°47'17.94"E	x	x	x	10
Loobu j.	Porgaste	59°32'27.20"N 25°47'47.04"E	x			10
Loobu j.	Joaveski	59°30'48.87"N 25°48'54.06"E	x			10
Mustajoki (Soome)		60°59'07.5"N 28°23'18.4"E				9
Mustoja j.		59°34'55.16"N 26°10'34.85"E	x			
Mägara o.		59°24'13.45"N 27°32'7.69"E	x			
Männiku o.		58°16'9.40"N 24° 4'58.25"E	x	x	x	
Nuutri j.		58°58'47.50"N 22°45'35.72"E	x	x	x	
Nõva j.	Kasesirge	59°11'25.96"N 23°41'25.02"E	x			
Nõva j.	Käbi	59°13'50.20"N 23°39'59.11"E	x	x	x	
Oju pkr		58°23'6.94"N 22° 0'27.61"E	x			
Pada j.		59°29'44.66"N 26°45'7.96"E	x	x	x	
Pidula o.		58°25'16.64"N 22° 7'9.46"E	x	x	x	11
Piirsalu j.		59° 4'39.13"N 24° 4'16.47"E	x			11
Pirita j.	Iru/veneküla	59°26'46.58"N 24°54'47.75"E	x	x	x	10

Pirita j.	Kose	59°11'14.38"N 25°10'0.92"E	x			
Pirita j.	Lükati	59°27'35.42"N 24°51'28.14"E	x			
Pirita j.	Vaskjala	59°21'41.84"N 24°56'50.91"E	x			11
Poama o.		58°56'1.41"N 22°21'9.25"E	x	x	x	
Pudisoo j.		59°30'31.07"N 25°35'40.58"E	x	x	x	11
Punapea j.	Traditsiooniline	58°35'0.26"N 22°29'20.56"E	x	x	x	
Punapea j.	Põitse	58°31'58.98"N 22°28'14.40"E	x			
Purtse j.	Alumine	59°25'53.50"N 26°59'36.61"E	x	x	x	11
Purtse j.	Sillaoru	59°24'21.20"N 27° 0'57.59"E	x			
Pärnu j.		58°24'32.68"N 24°38'54.30"E	x	x	x	
Pühajõgi	Orupark	59°25'10.78"N 27°31'40.00"E	x	x	x	11
Pühajõgi	Ülemine	59°24'12.48"N 27°32'11.48"E	x			
Riguldi j.	Alumine	59° 7'44.69"N 23°32'13.68"E	x			11
Riguldi j.	Ülemine	59° 6'46.58"N 23°34'28.90"E	x	x	x	
Ristioja		58°17'0.90"N 22°42'20.12"E	x	x	x	
Selja j.	Rutja	59°32'10.11"N 26°22'30.00"E	x	x	x	10
Selja j.	Arkna	59°23'26.94"N 26°23'31.38"E	x			
Selja j.	Varangu	59°23'16.33"N 26°21'2.99"E	x			11
Soonda o.		58°33'27.67"N 23°19'27.20"E	x			
Taaliku pkr.		58°36'9.30"N 22°58'26.60"E	x			
Timmkanal	Alumine	58° 7'56.73"N 24°34'18.18"E	x	x	x	
Timmkanal	Ülemine	58° 8'54.86"N 24°43'29.60"E	x			11
Tirtsu j.		58°28'43.64"N 22°15'12.70"E	x	x	x	
Toolse j.	Lastelaagri	59°31'28.95"N 26°28'13.69"E	x	x	x	
Toolse j.	Künka	59°28'34.19"N 26°27'57.46"E	x			
Toolse j.	Andja	59°27'11.43"N 26°27'49.78"E	x			
Trollbõle (Soome kalakasvatus)		59°58'48.21"N 20°23'46.06"E				11
Tuhala j.		59°13'35.79"N 24°57'59.03"E	x			
Tuhala nimetu oja		59°13'40.91"N 24°57'32.27"E	x			
Tõstamaa j.		58°19'57.86"N 23°59'50.47"E	x			
Tõrvajõgi		59°24'14.0"N 28°04'31.6"E				11
Vainupea o.		59°34'28.45"N 26°16'4.85"E	x			
Valgejõgi	Loksa	59°34'37.15"N 25°43'25.66"E	x	x	x	7
Valgejõgi	Kotka	59°32'30.94"N 25°44'29.20"E	x	x	x	8
Valkla o.		59°29'11.48"N 25°19'38.45"E	x	x	x	
Vanajõgi		58°53'9.42"N 22°26'2.76"E	x	x	x	11
Vasalemma j.		59°18'31.72"N 24°10'35.23"E	x	x	x	11
Vesiku o.		58°20'13.20"N 21°59'24.60"E	x	x	x	
Veski j.		59°13'34.08"N 23°42'13.81"E	x			
Veskioja		58°25'16.20"N 22° 8'3.80"E	x			
Vihterpalu j.		59°15'57.00"N 23°52'54.00"E	x	x	x	11
Võlupe j.		58°34'15.30"N 22°45'43.30"E	x			
Võsu j.	Laviku	59°33'3.04"N 25°57'12.33"E	x			
Võsu j.	Traditsiooniline	59°34'5.41"N 25°58'22.56"E	x			
Vääna j.	Vääna-Jõesuu	59°25'51.00"N 24°21'54.60"E	x	x	x	11

Vääna j.	Vahiküla	59°22'47.94"N 24°28'1.81"E	x			
Õngu o.		58°51'3.84"N 22°27'45.21"E	x			
Kokku			81	35	35	303

LISA 2. Peakkomponentanalüüsi tulemused – erinevate jõgede skoorid 1, 2 ja 3
peakomponendi kohta

Jõgi	PC1 skoor	PC2 skoor	PC3 skoor
Altja	-5,0752837	-0,6983468	-1,1564409
Angerja	3,0762404	1,3789169	-0,7013478
Angla	-7,0226805	-4,055238	-1,0169065
Häädemeeste	-3,5835187	-2,051379	-1,4602979
Höbringi	0,6363906	5,6451508	2,2556443
Jägala	1,4137168	0,5888	-1,0424266
Jämaja	0,8737662	-0,0894286	-2,1502197
Kaberla	-1,0561057	0,5351661	1,249324
Kaldamäe	-0,8248877	1,3394344	-0,267888
Keibu	-11,122793	1,3749924	2,2850823
Keila	1,1656973	-0,6660759	-1,0097612
Kiruma	-1,4616264	0,825898	-0,3941655
Kloosti	-2,8638854	-0,1317382	-0,3839622
Kolga	0,4800465	-0,4329305	-1,7840169
Kuivajõgi	2,4597513	0,634793	-0,8166623
Kunda	3,1535216	0,7287828	-0,3755453
Kuusalu	3,7303219	1,6639886	0,3695951
Kõrtsioja	2,3425302	1,7172772	0,3151486
Leisi	-2,3545501	-4,3564977	-2,1479987
Leiva	-1,1993889	0,6518128	-1,0899415
Lige	9,0205974	1,5654285	-0,4849842
Loo	-0,9713379	0,0738205	0,3363915
Loobu-vihas	-0,7452965	0,2045449	0,9073561
Loobu-porg	-2,7243469	0,1522393	-0,8198277
Loobu-joav	-1,9906164	0,3913467	0,217733
Mustaoja	4,4071563	0,3833629	-0,0335559
Mägara	2,5963703	-2,7437353	-0,878821
Männiku	-2,4144145	1,2058439	-2,1034165
Nutri	-9,320054	0,7935313	0,6607715
Nõva-kase	-2,1127621	3,839594	3,1548122
Nõva-käbi	-3,9862899	0,9754285	0,9481891
Oju	3,4076867	1,4111327	-0,1171263
Pada	3,0892702	-0,3033314	-0,3164379
Pidula	4,2414575	1,5157087	0,1771138
Piirsalu	-3,0255076	0,4610276	-0,1687163
Pirita-vene	1,5759285	0,1421429	-0,367037
Pirita-kose	2,3591592	1,6203158	0,9449525
Pirita-lükat	1,4061265	-0,0989778	-1,6622104
Pirita-vask	2,1687721	1,4115203	-1,3051999
Poama	-4,7817338	-1,5261346	-0,054353
Pudisoo	-4,8293593	0,5251574	1,5181021

Jõgi	PC1 skoor	PC2 skoor	PC3 skoor
Punap-trad	-6,1336452	-1,0151773	-0,13304
Punapea-põi	-2,8176408	1,1599684	0,0430976
Purtse-alum	-1,7702948	-3,4307521	1,093329
Purtse-sillao	-2,1394524	-3,4346263	0,7502786
Pärnu	2,4698452	0,4410509	-0,3361728
Pühaj-oru	3,5291178	-7,2634709	3,9863072
Pühaj-ülem	3,4562871	-8,1464189	5,0789355
Riguldi-al	-3,3023888	0,7818331	-1,0792202
Riguldi-ül	-5,3403404	-0,8297359	-0,3607339
Ristioja	1,8581561	-4,1603767	-1,2011908
Selja-rutja	5,1640245	-0,1540932	1,098509
Selja-arkna	8,6874999	-0,8839824	2,1740746
Selja-varang	8,1538594	0,2883746	1,5410762
Soonda	3,5951578	-1,2602452	-2,3325708
Taaliku	0,7574792	-1,0399876	-1,0341312
Timmk-alu	-2,3877545	-0,7065813	-0,2358259
Timmk-ül	-0,2669822	-0,9938523	-0,7285451
Tirtsu	-5,4806054	-0,3622746	-0,1569846
Toolse-laste	9,6863866	-0,3928095	0,6246422
Toolse-künk	9,3860022	-0,7402046	0,6275494
Toolse-andj	9,3492209	-0,8243477	-0,7001867
Tuhala	1,936396	3,747356	0,5868356
Tuha nim o.	4,3474071	2,0048074	-0,7185777
Tõstamaa	1,3940465	2,3616722	0,4591174
Vainupea	-6,2747804	-1,2502225	0,457183
Valgej-loksa	-1,4218599	1,0196347	-2,9645823
Valgi-kotka	0,1654859	1,628141	0,15569
Valkla	-1,3049669	0,0252556	-0,2826622
Vanajõgi	-3,1076486	2,4321534	1,0451001
Vasalemma	1,2276687	0,5920924	-0,466305
Vesiku	0,437994	1,8659513	-0,7498067
Veski	-2,1558096	3,4688154	2,5587654
Veskio	6,8245921	1,7367913	-0,9373042
Vihterpalu	-3,8103913	0,7651757	0,579651
Võlupe	-0,9142882	-4,8367185	-1,7810072
Võsu-laviku	-4,4662533	0,6562259	0,5648731
Võsu-trad	-3,4902559	2,1500181	0,4866348
Vääna-jões	-0,460468	-1,5240269	-0,1806964
Vääna-vahi	-0,5895753	-1,9750014	-0,9306181
Õngu	-4,9292938	1,4962433	2,1675634

LISA 3. Peakomponentanalüüsi tulemused – erinevate elementide laadungid.

Muutuja	PC1	PC2	PC3
Ba	0,069	-0,253	-0,047
Ca	0,124	-0,238	-0,307
Cd	-0,118	-0,08	-0,261
Ce	-0,229	-0,046	0,036
Cr	-0,151	0,021	-0,227
Cu	-0,06	-0,172	-0,373
Dy	-0,231	-0,067	-0,008
Er	-0,228	-0,08	-0,01
Eu	-0,18	-0,167	0,068
Fe	-0,185	0,065	0,199
Gd	-0,231	-0,056	0,01
Ho	-0,22	-0,055	0,01
K	0,063	-0,338	0,341
La	-0,229	-0,049	0,01
Li	0,103	-0,371	0,114
Lu	-0,214	-0,07	-0,048
Mg	0,149	-0,256	-0,19
Mn	-0,166	-0,014	0,128
Na	0,096	-0,248	0,181
Nd	-0,231	-0,053	0,013
Pr	-0,231	-0,053	0,013
Rb	0,035	-0,33	0,352
Sc	-0,065	-0,205	-0,119
Sm	-0,231	-0,054	0,014
Sr	0,109	-0,361	-0,096
Zn	-0,035	0,082	-0,406
Tb	-0,223	-0,041	-0,027
Th	-0,22	-0,084	0,014
Tm	-0,216	-0,064	-0,033
U	0,118	-0,291	-0,258
Y	-0,231	-0,053	-0,013
Yb	-0,227	-0,09	-0,022

LISA 4. Diskriminantanalüüsi tulemused – element:Ca suhete ning Sr isotoopide suhete Partial Wilks' lambda väärtused ning CAN1 ja CAN2 struktuurikoefitsendid.

	Partial λ	CAN1 koefitsient	CAN2 koefitsient
Sr:Ca	0,044	0,647	-0,014
Ba:Ca	0,079	0,076	-0,667
⁸⁶ Sr: ⁸⁷ Sr	0,087	0,556	-0,507
Rb:Ca	0,259	-0,012	0,163
Mn:Ca	0,393	-0,020	-0,044
Mg:Ca	0,734	-0,017	0,023
Pb:Ca	0,753	-0,026	-0,040

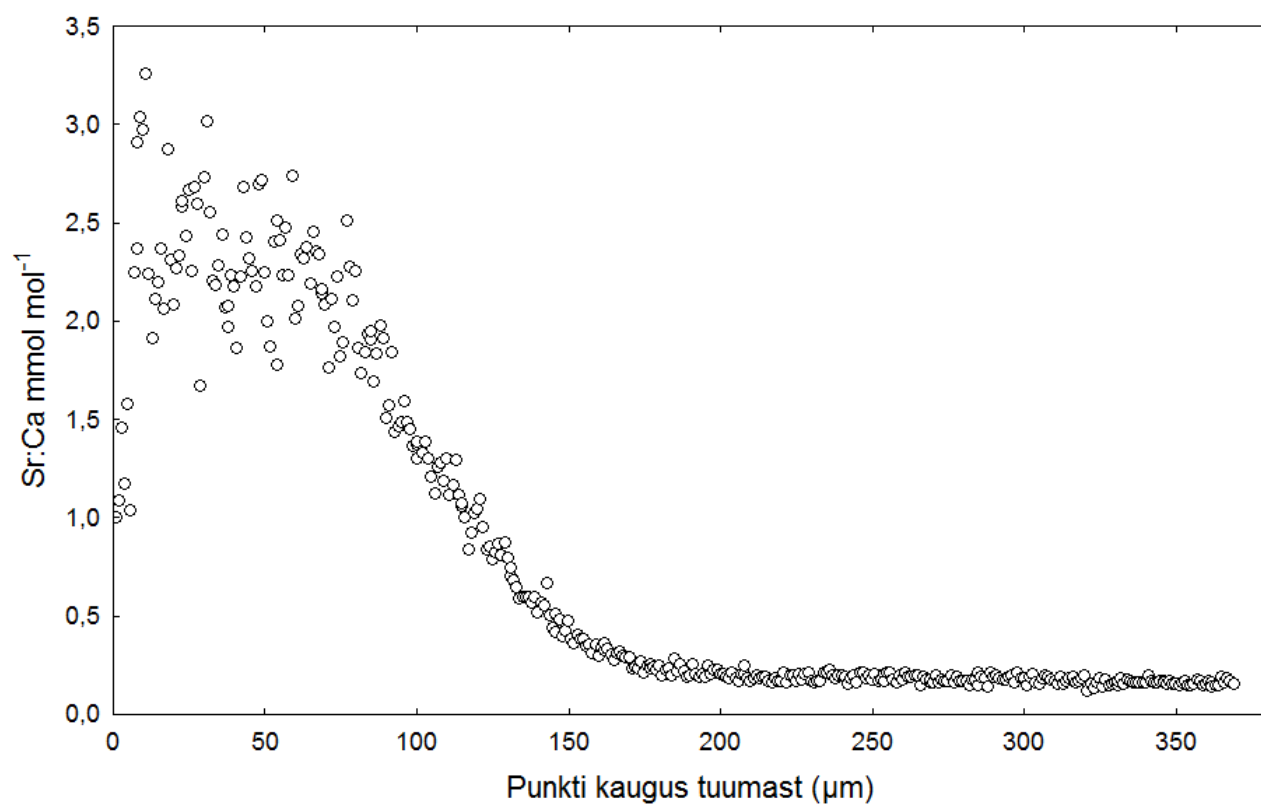
LISA 5. Diskriminantanalüüsi tulemused – esimese ja teise kanoonilise funktsiooni skoorid vastavalt igale kalade kogumise punktile (jõe).

Jõgi	CAN 1	CAN 2
Hankasalmi	29,64858	0,30065
Höbringi	-2,82124	1,59209
Ingarskila	21,08417	-3,82238
Keila	-4,92359	0,44651
Kolga	-1,16430	1,03588
Kunda	-7,00173	-1,76748
Longinoja	17,27055	0,50607
Loobu-vihasoo	-7,29925	-1,34625
Loobu-joaveski	-9,15171	-1,15118
Loobu-porgaste	-7,20774	-2,11132
Mustajoki	22,53841	-1,61548
Pidula	-3,84961	2,95970
Piirsalu	-4,07261	3,15180
Pirita-veneküla	-6,28520	0,31326
Pirita-vaskjala	-5,91865	1,06285
Pudisoo	-2,09953	-1,41338
Purtse	3,53342	9,32213
Pühajõgi	-1,79194	3,67532
Riguldi	-1,35021	-0,65177
Selja-rutja	-5,58707	-0,16265
Selja-varangu	-4,51301	-2,13032
Timmkanal	-5,04784	-8,69165
Trollbõle	23,27055	-0,97042
Tõrvajõgi	-2,75092	-9,04110
Valgejõgi-loksa	-7,01592	0,14473
Valgejõgi-kotka	-6,64411	0,04685
Vanajõgi	-2,08788	5,74094
Vasalemma	-6,04177	1,70988
Vihterpalu	-2,55809	1,90986
Vääna	-3,19593	-0,18579

LISA 6. Erinevatest vooluveekogudest pärit forellide tagasiklassifitseerimine sünnijõkke. % all on näidatud tagasiklassifitseerimise edukus, rasvases kirjas on õigesti tagasi määratud kalade arv.

	%	Hank	Hõb	Ingar	Keil	Kolg	Kund	Long	Loobvih	Loobjoa	Loobporg	Musta	Pidul	Piirs	Pirven	Pirvas	Pudi	Purts	Püha	Rigl	Selrut	Selvar	Tim	Troll	Tõrv	Valgkot	Valglok	Vana	Vasa	Viht	Vään
Hank	100,0	11																													
Hõb	100,0	5																													
Ingar	100,0		7																												
Keil	54,5				6		1								1						1								1		1
Kolg	90,9					10																								1	
Kund	81,8						9		1						1																
Longi	100,0							8																							
Loobvih	90,0									9		1																			
Loobjoa	90,0									1	9																				
Loobporg	70,0						1		1	1	7																				
Musta	66,7							2				6												1							
Pidul	90,9												10		1																
Piirs	63,6				2									7				1												1	
Pirven	45,5				1				1		1				5	1										1			1		
Pirvas	100,0															10															
Pudi	100,0																11														
Purts	100,0																	11													
Püha	100,0																		11												
Rigl	90,9																			10										1	
Selrut	100,0																				10										
Selvar	80,0																				2	8									
Tim	90,9																						10		1						
Troll	100,0																							11							
Tõrv	100,0																								11						
Valgkot	42,9														1												3	3			
Valglok	37,5						1		1						1											1	3		1		
Vana	81,8													1					1										9		
Vasa	81,8														1														9		1
Viht	90,9				1																									10	
Vään	90,9				1																										10
Kokku	84,8	11	5	7	11	10	12	10	14	10	9	6	10	8	11	11	11	12	12	10	13	8	10	12	12	5	6	9	12	13	12

LISA 7. Vanajõe meriforelli otoliidi Sr:Ca profiil. Profiililt on näha kõrgeenenud Sr sisaldus otoliidi tuuma osas (emalt saadud mereline Sr). Sõrmejälje väärtus võeti profiili stabiliseerunud osast.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Lagle Matetski

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Erinevast jõest pärit meriforelli (*Salmo trutta*) eristamine otoliidi elemendilise sõrmejälje abil

(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on Mehis Rohtla ja Roland Svirgsden

(juhendaja nimi)

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **26.05.2014**